

UNIVERSIDAD DEL NORTE
Maestría en Ingeniería Administrativa

DISEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE LA EMPRESA QUIMICOS
COLOMBIA S.A.

Preparado por:
Carlos Herrera
Rodrigo Osorio

Tutores:
Ing. Carmenza Luna Amaya
Ing. Rita Peñabaena Niebles



Barranquilla, Colombia
2017

DECLARACIÓN DE AUTORÍA ORIGINAL

El informe del proyecto que figura en este documento no ha sido presentado previamente para optar por un título o diploma en esta o en cualquier otra institución de educación superior. Es resultado del conocimiento y creencia de los autores y no contiene ningún material publicado o escrito por otra persona excepto donde previamente se hace la referencia.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Norte, en los profesores que con sus conocimientos y consejos aportaron a nuestra formación en este programa de Maestría; a las ingenieras tutoras. Destacamos la asesoría profesional para este trabajo de grado dada por el ingeniero Rene Amaya; y también agradecemos a los compañeros de curso y amigos que indirectamente apoyaron la consecución de este logro.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14
CAPÍTULO 1. OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN	16
1.1. Antecedentes de la empresa	16
1.2. Planteamiento del problema	18
1.2.1. Identificación de la problemática	18
1.2.2. Antecedentes de la problemática	20
1.2.3. Justificación	23
1.3. Objetivos y resultados esperados	23
1.3.1. Objetivo General	23
1.3.2. Objetivos Específicos	24
1.3.3. Resultados esperados	24
1.4. Metodología de la investigación	24
1.5. Etapas metodológicas del proyecto	25

1.5.1. Etapa I: Revisión literaria	25
1.5.2. Etapa II: Entendimiento de la situación actual	25
1.5.3. Etapa III: Diseño del modelo matemático.....	26
1.5.4. . Etapa IV. Análisis de resultados y documentación de la propuesta para la red de distribución.....	26
1.6. Alcance y Limitaciones	27
2. CAPÍTULO II. MARCO DE REFERENCIA	28
2.1. Marco Conceptual.....	28
2.2. Marco Teórico.....	37
2.2.1. La planeación estratégica de la logística y el problema de la configuración de la red.	37
2.2.1.1. Estrategia y planeación de la logística y de la cadena de suministros.	38
2.2.1.2. El problema de la configuración de la red.	39
2.2.1.3. Ubicación de múltiples instalaciones	41
2.2.2. Métodos matemáticos para resolver problemas de ubicación de locaciones	42
2.2.2.1. Métodos exactos o de optimización.....	42
2.2.2.2. Métodos de simulación.....	44

2.2.2.3. Modelos heurísticos.....	45
2.2.2.4. Ventajas del uso de los modelos de optimización	46
2.2.3. Metodología para resolver un problema mediante programación lineal entera mixta	48
2.2.3.1. La función objetivo.....	51
2.2.3.2. Las variables de decisión	51
2.2.3.3. Las restricciones.....	52
2.2.3.4. Lenguaje de modelado	53
3. CAPITULO III. DISEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN	55
3.1. Caracterización del proceso de distribución actual.....	55
3.1.1. Análisis distribución de la demanda actual.....	56
3.1.2. Requerimientos especiales y restricciones del modelo	58
3.2. Elaboración modelo lineal de programación entera mixta	59
3.2.1. Definición de la función objetivo.	60
3.2.2. Identificación y definición de parámetros y variables de decisión	62
3.2.3. Identificación y definición de las restricciones.	72
3.2.4. Planteamiento de la función objetivo	73

3.3. Programación en GAMS.....	74
4. CAPITULO IV.ANALISIS DE RESULTADOS Y DOCUMENTACIÓN DE LA PROPUESTA	75
4.1. Resultados de GAMS	75
4.2. Análisis e interpretación de los resultados.....	78
4.3. Propuesta de la nueva red de distribución.....	80
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	83
5.1. CONCLUSIONES.....	83
5.2. RECOMENDACIONES.....	84
BIBLIOGRAFÍA	86
ANEXOS	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Distribución de la carga por unidad de negocio.....	19
Tabla 2 Distribución porcentaje de carga por región	19
Tabla 3 Volumen en Kg por unidad de negocio transferido desde las diferentes bodegas a las regiones destino.....	20
Tabla 4 Volumen en Kg transferido por negocio desde las diferentes bodegas a las regiones destino.	21
Tabla 5 Tipo de vehículo utilizado por destino desde el centro de distribución.	22
Tabla 6 Porcentaje (%) de Utilización de capacidad por tipo de vehículo	23
Tabla 7 Estado de arte revisado.....	48
Tabla 8. Volumen en Kg transferido desde las bodegas actuales a las diferentes regiones destino.....	58
Tabla 9 Plantas de producción	62
Tabla 10 Ubicaciones de bodegas a evaluar por el modelo	63
Tabla 11 Clientes en Colombia de la empresa Químicos SA.....	63
Tabla 12 Productos de la empresa Químicos SA.....	64
Tabla 13 Costo de transporte de la planta a la bodega por Kg	65
Tabla 14 Costo de transportar desde una bodega al cliente por Kg, en pesos colombianos	66
Tabla 15 Costo de almacenamiento por bodega por Kg	66
Tabla 16 Precios de productos por Kg	66
Tabla 17 Lead Time de transporte entre la planta y la bodega en días.....	67
Tabla 18 Lead del transporte entre la bodega y el cliente en días	68
Tabla 19 Número de meses promedio que el producto pasa almacenado en bodega	68

Tabla 20 Demanda de producto por cliente en Kg	70
Tabla 21 Capacidad anual de las bodegas en KG	70
Tabla 22 Costo de abrir una bodega en pesos colombianos	71
Tabla 23 Capacidad de producción para cada producto	71
Tabla 24 Bodegas a abrir de acuerdo a la variable binaria Z del modelo.....	75
Tabla 25 Bodega desde la que se debe atender la demanda de cada cliente por producto en Kg	77
Tabla 26 Distribución por producto en cada bodega en Kg.....	77
Tabla 27 Cantidad de Kg de cada producto a movilizar por la bodega de Cartagena Fuente:	80
Tabla 28 Cantidad de Kg de cada producto a movilizar por la bodega de Medellín	81
Tabla 29 Cantidad de Kg de cada producto a movilizar por la bodega de Bogotá Fuente:	81
Tabla 30 Cantidad de Kg de cada producto a movilizar por la bodega de Cali	81

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1 Clasificación de vehículos de carga en COLOMBIA, determinada en la Resolución 1782 de 2009.....	36
Imagen 2. Red generalizada de flujo de producto.	40
Imagen 3 Metodología para resolver un problema mediante programación lineal	50
Imagen 4 Relación entre la pregunta fundamental del problema y la función objetivo	51
Imagen 5. Red de distribución actual de Químicos Colombia S.A.	56
Imagen 6. Mapa de calor de la demanda en Colombia	57
Imagen 7 Nueva Red de distribución propuesta para la empresa Químicos Colombia S.A	82

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Planteamiento modelo PLM en GAMS.....	88
Anexo 2.Resultados modelo MIP en GAMS.....	93

RESUMEN

En este trabajo de grado pretende diseñar la red de distribución que mejor se ajuste a las necesidades actuales de la empresa Químicos de Colombia S.A. Esta empresa en los últimos años ha comenzado a diversificar su portafolio de productos para entrar a diferentes mercados, lo que ha aumentado la complejidad de la distribución de sus productos en el país, tanto por el mayor volumen vendido como el mayor número de clientes y destinos. Todo esto ha transcurrido sin que se haya hecho un ajuste adecuado de su estrategia de distribución, lo que ha ocasionado que existan flujos no óptimos e ineficiencias logísticas en la actual red de distribución.

Para resolver esta problemática se desarrolla un modelo matemático de programación lineal entera mixta en la herramienta GAMS, teniendo en cuenta las posibles ubicaciones fundamentadas en la distribución geográfica de la demanda futura y en la disponibilidad del operador logístico. Este modelo cuenta con costos reales de la operación y cotizaciones de valores de mercado para todos los escenarios tanto de almacenamiento como de transporte.

Al obtener el resultado final del modelo se realiza un análisis e interpretación en la empresa Químicos SA para validar la factibilidad, aplicabilidad y practicidad de la solución propuesta por el modelo. Con esto último se construye la propuesta final de la red de distribución que le permita a la compañía tener una posición más competitiva con mejores costos de transporte y almacenamiento.

El resultado final del presente trabajo de grado es la propuesta de la nueva red de distribución de la compañía, especificando el número de bodegas con su respectiva ubicación, los productos que serán almacenados en cada una de ellas y los clientes a atender desde cada ubicación

Palabras Claves: Red, distribución, modelo matemático, programación lineal entera mixta, transporte, almacenamiento, GAMS.

ABSTRACT

This graduation project aims to find the distribution network better adjusted to the current needs of the company Químicos SA de Colombia, which in recent years has been diversifying its portfolio of products to enter to different markets, which has increased the distribution complexity of its products within the country, both for the higher volume sold and the greater number of customers and destinations. All this has passed without an adequate adjustment of its distribution strategy, which has caused non-optimal flows and logistical inefficiencies in the current distribution network.

To solve this problem, a mathematical model of mixed-integer linear programming will be developed in GAMS tool that simulates company's dynamic with probable location to open a new warehouse. This model counts with real cost operation and quotations for new locations and routes.

With model's final result an analysis and interpretation will be done with Quimicos SA to validate feasibility, applicability and practicality of the solution proposed by the model. With that the final proposal for the distribution network, that allows the company to have more competitive position with better transportation and storage cost, is built.

The final result of the graduation project is a proposal of the new distribution network of the company, specifying the number of warehouses with their respective location, products to be stored in each one of them and customer to supply from each location

Keywords: distribution network, mathematical model, linear programming, transport, storage, GAMS.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado aborda el estudio de la red de distribución de la empresa Química SA de Colombia, compañía dedicada a la producción y distribución de Químicos de uso industrial con una trayectoria de más de 50 años en Colombia. Esta compañía inició comercializando los productos fabricados en sus plantas de manufactura localizadas en Barranquilla y Cartagena, correspondientes a la unidad de negocio agrícola y poliestireno; con el tiempo fue introduciendo productos de otras unidades de negocios (infraestructura, recubrimientos, entre otros) provenientes de las diferentes plantas del mundo para satisfacer las necesidades del mercado Colombiano, iniciando así la importación de productos.

Con la integración de nuevos productos, el tamaño del portafolio fue creciendo rápidamente, incrementando las ventas totales debido al aumento del consumo de sus clientes actuales así como en la adquisición de nuevos clientes. Actualmente lo que producen las plantas situadas en Colombia representa alrededor del 50% de las ventas totales en Colombia, lo que muestra el crecimiento que han tenido las demás unidades de negocio en el país. Debido a esto se ha incrementado la complejidad de la distribución de los productos, ya que ahora se cuenta con más clientes, distribuidos en un mayor número de regiones del país.

La red de distribución con la que cuenta la compañía actualmente fue diseñada hace más de 10 años y pensada para las necesidades de ese momento, y desde entonces se ha seguido utilizando sin validar las necesidades del mercado actual. Sin embargo con los cambios descritos previamente y teniendo en cuenta que la estrategia comercial apunta a seguir creciendo en los mercados donde tiene baja participación, se evidencia la necesidad de realizar un análisis completo de la red de distribución actual para definir los cambios requeridos y contar con una red más competitiva.

La distribución actual es realizada de forma directa a los clientes desde las plantas

de producción y a través de un centro de distribución en Medellín o una bodega en Bogotá, las cuales reciben el producto importado que llega desde los puertos de Cartagena o Barranquilla. En el análisis de los movimientos de carga del año 2016, se evidenció que el mayor porcentaje de la demanda lo tiene el centro del país (Cundinamarca) con un 45%, a pesar que el centro de distribución principal está ubicado en Medellín; también se evidenció que para muchos clientes ubicados en la costa caribe su suministro proviene del centro de distribución en Medellín, lo que significa que se está enviando producto de los puertos de Cartagena y Barranquilla hacia Medellín para luego ser transportados devuelta hacia el norte del país. Adicionalmente se evidenció que la utilización de los vehículos está entre el 70% y 80%, es decir, estamos dejando de utilizar entre el 30% y el 20% de la capacidad de los vehículos. Esto es aún más representativo cuando se mira que el tipo de vehículo con mayor flete muerto (cerca del 45% de ocupación) es el más costoso (Turbo) y el más utilizado. Todo esto revela que existen flujos no óptimos e ineficiencias logísticas en la actual red de distribución.

Para la solución de esta problemática se realizará un diagnóstico de la red de distribución actual, luego se desarrollará un modelo matemático de programación lineal entera mixta que represente el sistema actual y para mostrar su validez se comparará con los resultados del ejercicio de la empresa de 2016. Posteriormente este modelo será utilizado para analizar unos escenarios potenciales que el proyecto identificará de acuerdo a las oportunidades que se encuentren en la caracterización del proceso y las opciones disponibles para la implementación.

Finalmente, se escogerá la mejor red de distribución para la compañía basándose en los resultados del modelo matemático y las necesidades y requerimientos actuales, así como la estrategia definida por la compañía. Todo esto se documentará en detalle indicando el número de bodegas requeridas con su respectiva ubicación y los productos que se almacenarán en cada una de ellas con el fin de tener una red de distribución más competitiva que le permita reducir los costos tanto de transporte como de almacenamiento.

CAPÍTULO 1. OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN

En este primer capítulo se proporciona una breve descripción de la empresa en estudio. Seguidamente se identifica la problemática con sus respectivos antecedentes donde se exponen los argumentos que dan paso a la justificación de la investigación. También se plantea los objetivos generales y específicos de la investigación y los resultados esperados, así mismo se presenta la respectiva metodología que se adopta y el diseño metodológico de las diferentes fases de investigación. Finalmente se establece el alcance y las limitaciones de la investigación.

1.1. Antecedentes de la empresa

Químicos SA fue fundada en 1897 por el químico canadiense Herving Howels, quien inventó un nuevo método de extracción del Bromo que estaba contenido en la Salmuera. La compañía fue fundada en Midland, Michigan y comenzó comercializando blanqueador y bromuro de potasio. 127 años después Químicos SA combina el poder de la ciencia y la tecnología para innovar con pasión aquello que es esencial para el progreso humano. La Compañía promueve innovaciones que extraen el valor de la intersección entre la química, la física y las ciencias biológicas para ayudar a resolver muchos de los problemas más apremiantes que enfrenta el mundo, tales como la necesidad por agua potable, la generación y conservación de energía limpia y el aumento de la producción agrícola.

El portafolio integrado, orientado al mercado y líder en la industria de Químicos SA, compuesto por químicos especializados, materiales avanzados, ciencias agrícolas y plásticos, ofrece una amplia variedad de productos y soluciones basados en tecnología a clientes en aproximadamente 180 países y en sectores de rápido crecimiento como embalaje, electrónica, agua, recubrimiento y agricultura. En 2014, Químicos SA obtuvo ventas anuales de más de \$58,000 millones de dólares y dio

empleo a unas 53,000 personas alrededor del mundo. Más de 6,000 familias de productos de la compañía se fabrican en 201 plantas en 35 países del mundo¹.

En Latinoamérica Químicos SA comenzó en 1956, cuando la compañía instaló unas oficinas de ventas en Sao Paulo, Brasil para importar químicos. En los años siguientes constituyó Química do Brasil S/A así como Química Argentina con actividades enfocadas en venta de poliglicoles, solventes oxigenados y polioles. En 1959 estableció Química Mexicana y construyó su primera planta en Latinoamérica para formular productos para el negocio agrícola.

En las siguientes décadas construyó diversas plantas en Argentina, Chile y Brasil, con un amplio portafolio de productos como látex, polioles, polietileno, etilenos, propilenglicol, soda cáustica, herbicidas y fungicidas entre otros químicos. Siendo las oficinas de Sao Paulo, Brasil la sede principal de Latinoamérica.

Químicos SA inició operaciones en Colombia en 1960 construyendo una planta de herbicidas inicialmente en Bogotá (esta planta fue relocalizada a Cartagena en 1970). En 1965 cuando Latinoamérica se posesionó como área geográfica estratégica para mercados como Europa, Pacífico, Canadá y Estados Unidos, Químicos SA construyó una segunda planta en Cartagena para la producción de Poliestireno. Luego en el 2001 con la adquisición de otra empresa multinacional a nivel global incorporó una nueva planta de Fungicidas ubicada en Barranquilla, Atlántico.

Químicos SA Colombia se convirtió en la sede principal de la Región Andina, compuesta por Ecuador, Perú y Venezuela. Actualmente cuenta con una oficina principal en Bogotá y tres plantas manufactureras en Barranquilla y Cartagena. Éstas producen polioles, sistemas de poliuretanos y productos agroquímicos como herbicidas, insecticidas y fungicidas, que se comercializan a nivel nacional y se exportan a la Región Andina, Centroamérica, el Caribe, Europa y varios países del Pacífico.

¹ Químicos S.A. Intranet (1995-2017). Acerca de Químicos S.A. Recuperado de: <http://co.quimicoss.a.com/es-co/about-quimicosa>

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Identificación de la problemática

La red de distribución de la empresa Químicos Colombia SA fue diseñada hace más de 10 años de acuerdo a las condiciones y/o requerimientos presentes en esa época. Para entonces la mayor proporción de ventas estaban constituidas por los productos de las unidades de negocio de Polyols e Isocyanates, cuya fabricación se efectúa en la planta que la empresa tiene ubicada en la zona industrial de Cartagena.

La distribución actual es realizada de forma directa a los clientes desde las plantas de producción y a través de un centro de distribución en Medellín o una bodega en Bogotá. Al centro de distribución llega producto manufacturado localmente y producto importado de otros países del mundo, el cual es importado al país a través de los puertos de Cartagena y Barranquilla; mientras que la bodega de Bogotá recibe producto directamente del centro de distribución.

Los productos que se importan al país pertenecen a otras unidades de negocio, diferentes a las de Polyols e Isocyanates y la tendencia es a que la proporción del total de ventas en Colombia que estos representan sea creciente, debido a que el negocio de Polyols e Isocyanates cuenta con una participación de mercado del 70% local y según investigaciones de mercado su crecimiento no será mayor al 1% anual por lo menos en los próximos 5 años. Hoy en día las otras unidades de negocio representan cerca del 46% de las ventas de Químicos SA en Colombia, como se indica en la siguiente tabla:

Negocio	Producto Movido
POLYOLS	31.93%
ISOCYANATES	22.87%
ARCHITECTURAL COATINGS	11.03%
POLYURETHANE SYSTEMS	8.80%
VINYL ACETATE MONOMER	6.53%
OXYGENATED SOLVENTS	4.96%
CONSTRUCTION CHEMICALS	4.47%
HOME INSTITUTIONAL&PERSONAL CARE	3.34%
AMINES	2.38%
ACRYLIC MONOMERS	1.32%
DOW MICROBIAL CONTROL	1.14%
PO/PG	0.81%
POLYGLYCOLS SURFACTANTS & FLUIDS	0.27%
DCM INDUSTRIAL	0.09%
PLASTIC ADDITIVES	0.05%
DOW OIL, GAS & MINING	0.01%
DOW PHARMA & FOOD SOLUTIONS	0.00%
Grand Total	100.00%

Tabla 1 Distribución de la carga por unidad de negocio

Fuente: Elaboración propia, 2017

Con la llegada de nuevos productos a Colombia llegaron nuevos clientes los cuales están ubicados en diferentes regiones del país y, por tanto, cambió la distribución de la carga en el territorio nacional. Anteriormente el departamento con mayor demanda era Antioquia, pero debido a los cambios anteriormente mencionados, el departamento con mayor demanda en la actualidad es Cundinamarca. Esto se evidencia en la siguiente tabla donde se detalla el porcentaje de carga que se distribuye a cada región:

Ubicación clientes	% de carga
Cundinamarca	45.92%
Antioquia	36.52%
Cauca	9.56%
Valle del Cauca	3.87%
Atlántico	1.77%
Bolívar	1.39%
Santander	0.89%
Magdalena	0.07%
Grand Total	100.00%

Tabla 2 Distribución porcentaje de carga por región

Fuente: Elaboración propia, 2017

1.2.2. Antecedentes de la problemática

El 100% de los productos que importa Químicos Colombia SA llegan por Cartagena y Barranquilla, y posteriormente son trasladados al centro de distribución en Medellín. Hoy en día se tienen clientes ubicados en los departamentos Atlántico y Bolívar que consumen de los productos que almacenamos en Medellín lo que hace que se tenga un transporte desde esta bodega nuevamente hacia el norte del país.

En la siguiente tabla se encuentra el volumen por cada unidad de negocio transferido desde las diferentes bodegas hacia las regiones destino. En las filas se encuentran las diferentes unidades de negocios y los lugares desde donde fue despachado el producto; en las columnas se encuentra el departamento destino al que fue transportado el producto. Los cuadros rojos resaltan el producto que viaja desde los puertos de la costa hasta Medellín para luego volver y ser entregado a un cliente en el Atlántico, lo cual claramente representa una ineficiencia tanto en transporte como en costos.

Negocio/Locación	Destino							Grand Total
	Antioquia	Atlántico	Bolívar	Cauca	Cundinamarca	Magdalena	Santander	Valle del Cauca
ARCHITECTURAL COATINGS	810,131	10,000			766,886		40,000	1,627,017
Bodega R&H Medellín	810,131	10,000			766,886		40,000	1,627,017
CONSTRUCTION CHEMICALS	940,800	60,500			418,750		4,000	1,487,850
Bodega Dow Medellín	439,700	34,500			364,250			890,450
Bodega R&H Medellín	440,200				5,600		4,000	449,800
Terminal Barranquilla	60,900	26,000			48,900			147,600
DCM INDUSTRIAL	1,075				27,959			29,034
Bodega R&H Medellín	1,075				27,959			29,034
DOW MICROBIAL CONTROL	21,445	16,500			57,730	500		110,795
Bodega R&H Medellín	21,445	16,500			57,730	500		110,795
DOW OIL, GAS & MINING						2,240		2,240
Bodega R&H Medellín						2,240		2,240
DOW PHARMA & FOOD SOLUTIONS								1,050
Terminal Barranquilla								1,050
HOME INSTITUTIONAL&PERSONAL CARE					830,600			14,620
Bodega R&H Medellín					735,020			14,620
Terminal Barranquilla					95,580			95,580
PLASTIC ADDITIVES					15,000			15,000
Terminal Barranquilla					15,000			15,000
POLYGLYCOLS SURFACTANTS & FLUIDS	23,650					860		24,510
Terminal Barranquilla	23,650					860		24,510
POLYURETHANE SYSTEMS	1,247		68,585	470,822	144,387			99,242
Planta Cartagena	1,247		68,585	1,247	8,419			79,498
Bodega Dow Medellín			469,575	135,968				99,242
Grand Total	1,798,348	87,000	68,585	470,822	2,261,312	3,600	44,000	190,332

Tabla 3 Volumen en Kg por unidad de negocio transferido desde las diferentes bodegas a las regiones destino.

Fuente: Elaboración propia, 2017

En la tabla 4 se resalta la cantidad de producto que es transportada desde el centro de distribución a Medellín al centro del país, específicamente a Cundinamarca. De estos volúmenes destacan las 735 toneladas del negocio de Home Institutional & Personal Care que fueron despachadas y vendidas en Bogotá desde Medellín pero que no registró ventas en Antioquia, es decir, el producto pudo haber sido transportado directamente a Bogotá sin la necesidad de pasar por el centro de distribución.

Negocio/Locación	Destino Antioquia	Atlantico	Bolivar	Cauca	Cundinamarca	Magdalena	Santander	Valle del Cauca	Grand Total
ARCHITECTURAL COATINGS	810,131	10,000			766,886		40,000		1,627,017
Bodega R&H Medellin	810,131	10,000			766,886		40,000		1,627,017
CONSTRUCTION CHEMICALS	940,800	60,500			418,750		4,000	63,800	1,487,850
Bodega Dow Medellin	439,700	34,500			364,250			52,000	890,450
Bodega R&H Medellin	440,200				5,600		4,000		449,800
Terminal Barranquilla	60,900	26,000			48,900			11,800	147,600
DCM INDUSTRIAL	1,075				27,959				29,034
Bodega R&H Medellin	1,075				27,959				29,034
DOW MICROBIAL CONTROL	21,445	16,500			57,730	500		11,620	107,795
Bodega R&H Medellin	21,445	16,500			57,730	500		11,620	107,795
DOW OIL, GAS & MINING						2,240			2,240
Bodega R&H Medellin						2,240			2,240
DOW PHARMA & FOOD SOLUTIONS								1,050	1,050
Terminal Barranquilla								1,050	1,050
HOME INSTITUTIONAL&PERSONAL CARE					830,600			14,620	845,220
Bodega R&H Medellin					735,020			14,620	749,640
Terminal Barranquilla					95,580				95,580
PLASTIC ADDITIVES					15,000				15,000
Terminal Barranquilla					15,000				15,000
POLYGLYCOLS SURFACTANTS & FLUIDS	23,650					860			24,510
Terminal Barranquilla	23,650					860			24,510
POLYURETHANE SYSTEMS	1,247	68,585	470,822		144,387			99,242	784,283
Planta Cartagena	1,247	68,585	1,247		8,419				79,498
Bodega Dow Medellin			469,575		135,968			99,242	704,785
Grand Total	1,798,348	87,000	68,585	470,822	2,261,312	3,600	44,000	190,332	4,923,999

Tabla 4 Volumen en Kg transferido por negocio desde las diferentes bodegas a las regiones destino.

Fuente: Elaboración propia, 2017

De un total de 4.924 toneladas despachadas en 2016 desde el centro de distribución se encuentra que tenemos cerca de 2000 toneladas de producto que es transportado desde la costa hasta el centro de distribución de Medellín pero que finalmente es vendido en el centro del país (Santander, Cundinamarca), es decir, se incurre en un costo del flete logístico 10% más alto que si se almacenara directamente en una bodega en el centro del país.

Cuando se revisan los movimientos de la carga desde el centro de distribución de Medellín por número de vehículos (ver tabla 5) se encuentra que el destino con el mayor número de viajes es Bogotá con un total de 70 despachos, representando más de la sumatoria de entregas entre Medellín y Rionegro:

# SERVICIO DESTINO	MES ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	Total general
BARRANQUILLA	3	1	4	1	9
MINIMULA			4	1	5
SENCILLO	1				1
TRACTOMULA	2	1			3
BOGOTA	18	13	21	18	70
MINIMULA	5		5	5	15
SENCILLO	4	6	3	4	17
TRACTOMULA	1		3	2	6
TURBO	8	7	10	7	32
CALI	7	7	5	7	26
MINIMULA	3	1	1	1	6
SENCILLO		2	1	2	5
TRACTOMULA				1	1
TURBO	4	4	3	3	14
CARTAGENA	1		1	2	4
MINIMULA	1		1	1	3
SENCILLO				1	1
MEDELLIN	16	8	10	3	37
MINIMULA	3	2			5
SENCILLO	2	2	6		10
TRACTOMULA	3				3
TURBO	8	4	4	3	19
RIONEGRO	5	7	7	6	25
MINIMULA	2	2	2	2	8
SENCILLO	1	1			2
TRACTOMULA		1	2	3	6
TURBO	2	3	3	1	9
Total general	50	36	48	37	171

Tabla 5 Tipo de vehículo utilizado por destino desde el centro de distribución.

Fuente: Elaboración propia, 2017

Otra ineficiencia en el transporte que se puede ver en la tabla anterior es que la mayoría de vehículos utilizados en los despachos hacia Bogotá son los más pequeños: Sencillos y Turbos. Esto representa un incremento en el costo de transporte porque entre más pequeño el vehículo es más costoso por tonelada y lo que generalmente se busca es hacer despachos de larga distancia en vehículos grandes y dejar los pequeños para los despachos cercanos.

Adicionalmente los valores de la utilización de los vehículos se encuentran entre el 70% y 80%, es decir, se está dejando de utilizar entre el 30% y el 20% de la

capacidad de los vehículos. Esto es aún más representativo cuando se mira que el tipo de vehículo con mayor flete muerto (cerca del 45% de ocupación) es el más costoso (Turbo) y el más utilizado.

OPTIMIZACIÓN.	MES SERVICIO					
TIPO VEHICULO		ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	Total general
MINIMULA		68%	79%	71%	63%	69%
SENCILLO		76%	78%	76%	71%	76%
TRACTOMULA		64%	69%	58%	68%	64%
TURBO		37%	52%	48%	44%	45%

Tabla 6 Porcentaje (%) de Utilización de capacidad por tipo de vehículo

Fuente: Elaboración propia, 2017

El análisis general realizado devela que existen flujos no óptimos e ineficiencias logísticas en la actual red de distribución.

1.2.3. Justificación

Este proyecto busca diseñar la nueva red de distribución de la empresa Químicos de Colombia SA en el país, para tener una operación más eficiente eliminando los flujos no óptimos y las ineficiencias logísticas. Con esta nueva red de distribución se espera tener una disminución en los costos de transporte y/o almacenamiento que lleven a la empresa a un mejor nivel de competitividad.

1.3. Objetivos y resultados esperados

1.3.1. Objetivo General

Diseñar la nueva red de distribución de la empresa Químicos Colombia S.A,

basada en un modelo matemático de programación lineal entera mixta que permita disminuir los costos de transporte y almacenamiento.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Conocer el estado del arte del diseño de redes de distribución y de los modelos de optimización
- Caracterizar el proceso de distribución actual de la empresa Químicos Colombia S.A.
- Diseñar el modelo de programación lineal entera mixta que represente la situación actual de la red de distribución.
- Analizar el resultado del modelo y documentar la propuesta de la nueva red distribución de la empresa Químicos Colombia S.A.

1.3.3. Resultados esperados

- Red de distribución actual caracterizada.
- Modelo de programación lineal entera mixta que represente la red distribución de la empresa Químicos Colombia S.A.
- Tabla de resultados del modelo de programación lineal entera mixta.
- Propuesta de la nueva red de distribución de la empresa Químicos Colombia S.A basados en el modelo de programación lineal entera mixta.

1.4. Metodología de la investigación.

El presente trabajo es parte de una investigación de tipo aplicada que pretende resolver una problemática específica de la red de distribución logística de una multinacional que opera en Colombia. El método de investigación utilizado será el análisis de la situación actual y la síntesis de los diferentes factores que influyen en la problemática para determinar la solución necesaria. La información para el

desarrollo del proyecto es producto de fuentes primarias obtenidas del sistema de información de la empresa en estudio, así como de fuentes secundarias como libros y artículos académicos para soportar el marco teórico de la investigación.

1.5. Etapas metodológicas del proyecto

Para desarrollar la nueva red de distribución de la empresa Químicos de Colombia S.A se seguirán las siguientes etapas:

1.5.1. Etapa I: Revisión literaria

- Se estudiará cuáles son los tipos de diseño de redes de distribución.
- Se hará una investigación de los diferentes modelos de optimización usados para simular las redes de distribución. Se determinará cuáles son los modelos de programación más comúnmente utilizados y sus justificaciones.

1.5.2. Etapa II: Entendimiento de la situación actual

- Se caracterizará el proceso de distribución actual.
- Se analizarán los datos de los movimientos logísticos de todos los productos y todos los negocios en Colombia realizados en el año 2016, para validar cómo están distribuida la demanda por ubicación geográfica, clientes, negocios.
- La siguiente información se obtendrá del sistema ERP de la compañía:
 - Carga movida entre puntos
 - Costos incurridos en fletes
 - Utilización de la capacidad de los vehículos
 - Costos de almacenamiento
- Se identificarán los requerimientos especiales y restricciones. Ejemplo:

Productos que requieran condiciones de almacenamiento especial (refrigerados) o que requieran servicio de maquila, como cambio de etiquetas o cambio tamaño de material de empaque. Esto con el fin de tener claro que productos no deben reubicarse sólo con el criterio de minimizar costos.

1.5.3. Etapa III: Diseño del modelo matemático

- Se elaborará un modelo de programación lineal entera mixta para representar la red de distribución actual, siguiendo los siguientes pasos:
 - Definición del criterio de la función objetivo.
 - Identificación y definición de las variables de decisión.
 - Identificación y definición de las restricciones.
 - Planteamiento de la función objetivo.
- Se definirán las ubicaciones potenciales basadas en la distribución geográfica de la demanda futura y disponibilidad del operador logístico.
- Se programará el modelo matemático en el software GAMS, usando los escenarios previamente definidos.

1.5.4. Etapa IV. Análisis de resultados y documentación de la propuesta para la red de distribución.

- Analizar e interpretar los resultados, teniendo en cuenta las necesidades, requerimientos internos y expectativas actuales de la compañía, para definir la mejor red de distribución.
- Documentar la propuesta de la red de distribución para la compañía Químicos Colombia S.A indicando el número de bodegas con su respectiva ubicación y productos a ser almacenados en cada una de ellas.

1.6. Alcance y Limitaciones

Este trabajo se enfocará en todos los productos empacados que la empresa Químicos SA distribuye en Colombia, ya sean importados o producidos dentro del país, es decir, no se incluirán los productos que se comercializan a granel por la imposibilidad de cambiar sus puntos de cargue, ya que estos se encuentran en los tanques de los terminales donde se reciben los buques.

El trabajo llegará hasta la documentación de la propuesta, que estará compuesta por el número de bodegas con su ubicación, productos a almacenar en cada una de ellas y a que clientes se atenderá desde cada una de las bodegas. Se deja por fuera la implementación y procesos como picking, desarrollo de rutas, formas de cargue y alistamiento de carga. Así mismo la selección del tipo de vehículo está fuera de alcance debido a que esta investigación solo abarcará la planeación logística estratégica.

En este capítulo se presentó el problema objeto de investigación, los objetivos generales y específicos, así como el alcance y las limitaciones de la investigación, y la propuesta metodológica de la investigación. Por tanto introducimos a continuación el capítulo que se centra en los referentes conceptuales y teóricos en que se fundamenta la investigación.

2. CAPÍTULO II. MARCO DE REFERENCIA

Este capítulo consta de dos partes. La primera correspondiente al marco conceptual, donde se exponen los conceptos y aspectos centrales relativos a las redes de distribución logística y cada uno de sus componentes, así como conceptos de modelos de optimización. Y una segunda parte correspondiente al marco teórico donde se revisa, analiza y resume la literatura sobre el objeto de estudio y se exponen los referentes teóricos primarios y secundarios en los que se basa el presente proyecto. Esta segunda parte se estructura en los siguientes aspectos: el problema de la configuración de las redes de suministro, la estrategia de ubicación de instalaciones, y las herramientas que se usan para definir el mejor diseño de redes. Al final de este capítulo se exponen los fundamentos que justifican la decisión de utilizar el modelo matemático de programación lineal entera mixta para diseñar la red de distribución.

2.1. Marco Conceptual

Para entender la base teórica sobre la cual están formuladas la estrategia para determinar la red de distribución más adecuada para la compañía Químicos Colombia S.A., a continuación se presentan los conceptos básicos que se consideran de importancia para la investigación:

- Almacén: Lugar de almacenamiento para los productos. Las principales actividades del almacén incluyen la recepción del producto, el almacenamiento, el envío y la selección de pedidos²
- Cadena de Suministro: 1) a partir de materias primas sin procesar y

² Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP) (Agosto, 2013). Supply Chain Management. Terms and Glossary. p. 212. Recuperado de:
http://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms

terminando con el cliente final utilizando los productos terminados, la cadena de suministro vincula a muchas empresas. 2) los intercambios materiales e informativos en el proceso logístico que van desde la adquisición de materias primas hasta la entrega de productos terminados al usuario final. Todos los proveedores, proveedores de servicios y clientes son enlaces en la cadena de suministro³

- Capacidad: Las instalaciones físicas, el personal y los procesos disponibles para satisfacer las necesidades del producto o servicio de los clientes. Por lo general, la capacidad se refiere a la capacidad máxima de producción o producción de una máquina, una persona, un proceso, una fábrica, un producto o un servicio o la cantidad máxima de espacio disponible, como la capacidad de almacenamiento del almacén⁴
- Capacidad de Producción: Medida de cuánto volumen de producción se puede experimentar durante un período de tiempo determinado⁵
- Carga: objeto de un envío. Mercancías transportadas de un lugar a otro.⁶
- Cargo de flete: La tarifa establecida para el transporte de carga⁷
- Centro de distribución: Almacén que mantiene el inventario de producto terminado pendiente de distribución a las tiendas o clientes apropiados⁸
- Consolidación de Carga: Acción de combinar envíos individuales en un solo lote para reducir costos o mejorar la utilización de equipos de transporte. La consolidación puede tomar diversas formas por el cliente, la geografía, la

³ Ibid. p. 186

⁴ Ibid. p. 28

⁵ Ibid. p. 155

⁶ Ibid. p. 29

⁷ Ibid. p. 87

⁸ Ibid. p. 63

tierra de envío o el horario. La consolidación puede ocurrir en la instalación de envío o puede ser un servicio de un tercero⁹

- Costos Fijos: Costos que no fluctúan con el volumen de negocios en el corto plazo. Los costos fijos incluyen elementos tales como la depreciación en edificios y accesorios¹⁰
- Costo unitario: El costo asociado con una sola unidad de producto. El costo total de producción de un producto o servicio dividido por el número total de unidades. El costo asociado a una sola unidad de medida subyacente a un recurso, actividad, producto o servicio. Se calcula dividiendo el coste total por el volumen medido. La medición del costo unitario debe ser usada con precaución, ya que puede no ser siempre práctica o relevante en todos los aspectos de la administración de costos¹¹
- Demanda: lo que los clientes o usuarios realmente quieren. Típicamente asociado con el consumo de productos o servicios en lugar de una predicción o pronóstico¹²
- Días de suministro: Medida de la cantidad de inventario en la mano, en relación con el número de días para el uso que se cubrirá. Por ejemplo, si un componente se consume en la venta o en la fabricación a razón de 100 por día, y hay 1.585 unidades disponibles en la mano, esto representa un suministro de 15,85 días. El objetivo, en la mayoría de los casos, es demostrar la eficacia con tener una alta tasa de rotación y por lo tanto un inventario de días bajos. Sin embargo, se dan cuenta de que esta relación puede ser desfavorable si es demasiado alta o demasiado baja. Una empresa debe equilibrar el costo de llevar el inventario con su unidad y los costos de

⁹ Ibid. p. 87

¹⁰ Ibid. p. 82

¹¹ Ibid. p. 206

¹² Ibid. p. 57

adquisición, con el potencial de pérdida de negocios y, en última instancia, los clientes perdidos si la escasez es omnipresente¹³

- Distribución: Las actividades asociadas con los movimientos de materiales desde el origen al destino. Se puede asociar con movimientos desde un fabricante o un distribuidor a los clientes, minoristas u otros puntos de almacenaje / distribución secundaria¹⁴
- GAMS: El General Algebraic Modeling System (GAMS) es un software de alto nivel para el modelado de sistema para la optimización matemática. GAMS está diseñado para modelar y resolver problemas lineales, no lineales y optimización entera mixta. El sistema está diseñado para aplicaciones de modelado a gran escala complejas y permite al usuario construir grandes modelos mantenibles que pueden adaptarse a las nuevas situaciones. El sistema está disponible para su uso en distintas plataformas informáticas. Los modelos son portátiles desde una plataforma a otra. ¹⁵.
- Granel: Mercancía transportada sin envase o embalaje, generalmente referido a minerales, semillas, abonos, líquidos, cementos, etc. ¹⁶
- Inventario: Componentes, materias primas, trabajo en proceso, productos terminados y suministros necesarios para la creación de bienes y servicios; También puede referirse al número de unidades y / o al valor de las existencias de bienes en poder de una empresa¹⁷
- Inventario en tránsito: Material que se mueve entre dos o más ubicaciones, generalmente separados geográficamente; por ejemplo, los productos

¹³ Ibid. p. 54

¹⁴ Ibid. p. 63

¹⁵ General Algebraic Modeling System (s.f.). En Wikipedia. Recuperado el 16 de diciembre de 2013 de: https://es.wikipedia.org/wiki/General_Algebraic_Modeling_System

¹⁶ Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP). Op.Cit. p. 60.

¹⁷ Ibid. p. 104

terminados que son enviados de una planta a un centro de distribución. El inventario en tránsito es un componente fácilmente olvidado de la disponibilidad total de la cadena de suministro¹⁸

- Importación: Movimiento de productos de un país a otro. La importación de automóviles de Alemania a los Estados Unidos es un ejemplo¹⁹
- Indicador clave de rendimiento (KPI): Una medida que es de importancia estratégica para una empresa o departamento. Por ejemplo, una métrica de flexibilidad de la cadena de suministro es Rendimiento de entrega en tiempo real del proveedor que indica el porcentaje de pedidos que se cumplen en o antes de la fecha original solicitada²⁰
- Logística: Es el proceso de planear, implementar y controlar el flujo y almacenamiento eficiente de materias primas, productos en proceso, bienes terminados y la información relacionada desde el punto de origen hasta el punto de consumo con el propósito de satisfacer las necesidades de los consumidores²¹
- Modelos determinísticos: modelo matemático en el que los resultados se determinan con precisión a través de relaciones conocidas entre estados y eventos, sin ningún espacio para la variación aleatoria. En tales modelos, una entrada dada siempre producirá la misma salida, tal como en una reacción química conocida. En comparación, los modelos estocásticos usan rangos de valores para variables en forma de distribuciones de probabilidad²²
- Modelos Estocásticos: Un modelo de proceso cuyo comportamiento es no

¹⁸ Ibid. p. 104

¹⁹ Ibid. p. 99

²⁰ Ibid. p. 110

²¹ Ibid. p. 117

²² Ibid. p. 60

determinista, en que el estado subsiguiente del sistema es determinado tanto por las acciones predecibles del proceso como por un elemento aleatorio²³

- Nivel de servicio: una métrica, mostrada como un porcentaje, que captura la capacidad de satisfacer la demanda o la capacidad de respuesta. Las tarifas de llenado de pedidos y el tiempo de actividad de la máquina o proceso son ejemplos de medidas de nivel de servicio²⁴
- Optimización: El proceso de hacer algo tan bueno o tan eficaz como sea posible con los recursos dados y las limitaciones²⁵
- Optimización de Procesos: El estudio del ajuste de procesos para optimizar un conjunto especificado de parámetros sin violar alguna restricción. Algunos de los objetivos más comunes de la optimización de procesos son minimizar los costos y maximizar el rendimiento y / o la eficiencia²⁶
- Pallets: La plataforma en donde los cartones se apilan y luego se utilizan para el envío o el movimiento como un grupo. Los pallets pueden estar hechas de madera o materiales compuestos. Algunos pallets tienen etiquetas de seguimiento electrónico (RFID) y la mayoría se reciclan.²⁷
- Participación de mercado: Parte de la demanda total del mercado para un producto o servicio específico que es proporcionado por un proveedor único²⁸
- Planificación Estratégica: Mirando de uno a cinco años en el futuro y diseñando un sistema logístico (o sistemas) para satisfacer las necesidades de los diversos negocios en los que está involucrada una empresa²⁹

²³ Ibid. p. 183

²⁴ Ibid. p. 175

²⁵ Ibid. p. 135

²⁶ Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP). Op.Cit. p. 154

²⁷ Ibid. p. 141

²⁸ Ibid. p. 122

²⁹ Ibid. p. 184

- Productividad: Una medida de la eficiencia de la utilización de los recursos; definida como la suma de las salidas dividida por la suma de las entradas³⁰
- Pronóstico (Forecast): Estimación de la futura demanda de los clientes. Los pronósticos se hacen típicamente utilizando técnicas científicas basadas en el uso histórico y ajustado para acomodar varios factores tales como ciclo de vida, patrones de uso cíclicos, promociones y acciones de precios³¹
- Pronóstico de ventas: Una predicción de ventas futuras basada en el desempeño pasado de un período de tiempo dado (promedio móvil de cinco meses) y análisis de las condiciones actuales del mercado³²
- Red de distribución: Una o más empresas o individuos que participan en el flujo de bienes y servicios desde el fabricante hasta el usuario final o consumidor³³
- Simulación: Técnica matemática para probar el rendimiento de un sistema debido a entradas inseguras y / o opciones inciertas de configuración del sistema. La simulación produce distribuciones de probabilidad para el comportamiento (salidas) de un sistema. Una empresa puede construir un modelo de simulación de su proceso de plan de construcción para evaluar el rendimiento del plan de construcción bajo múltiples escenarios de demanda de producto³⁴
- Solver: es una herramienta de Microsoft Excel que, entre otras funcionalidades, sirve para resolver problemas de programación lineal utilizando el método Simplex. En donde a partir de una función lineal a

³⁰ Ibid. p. 156

³¹ Ibid. p. 85

³² Ibid. p. 171

³³ Ibid. p. 63

³⁴ Ibid. p. 177


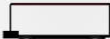

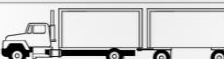








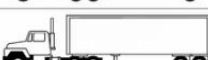


optimizar (encontrar el máximo o mínimo) y cuyas variables están sujetas a unas restricciones expresadas como inecuaciones lineales, el fin es obtener valores óptimos bien sean máximos o mínimos³⁵.








- Stock de seguridad: El inventario de una empresa tiene por encima de las necesidades normales como un amortiguador contra los retrasos en la recepción de la oferta o los cambios en la demanda de los clientes³⁶
- Tipos de transporte terrestre: Dentro del medio de transporte terrestre se tienen las siguientes especificaciones de vehículos:
 - Camión de plataforma abierta
 - Camión con carrocerías de estacas
 - Camión cerrado tipo furgón
 - Camión tolva
 - Camión tanque
 - Camión planchón
 - Camión reparto
 - Camión platón
 - Camión tanque
 - Camión para cargas especiales

Además de esta clasificación a grandes rasgos existe la denominación de los vehículos de carga con base en la disposición de los ejes (clasificación de vehículos de carga en COLOMBIA), determinada en la Resolución 1782 de 2009 que reemplaza a la resolución 4100 de 2004, tal como podemos observar a continuación:

³⁵ Yolanda Cuesta (Mayo, 2015). Solver en Excel. Recuperado de: <https://www.aboutespanol.com/solver-en-excel-1791023>

³⁶ Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP). Op.Cit.. 171

Designación	Configuración	Descripción	Designación	Configuración	Descripción
2		Camión de dos ejes Camión Sencillo	R2		Remolque de dos ejes
3		Camión de tres ejes Doblétrouque	2 R2		Camión de dos ejes con remolque de dos ejes
4		Camión de cuatro ejes	2R3		Camión de dos ejes con remolque de tres ejes
2S1		Tractocamión de dos ejes con semirremolque de un eje	3 R2		Camión de tres ejes Doblétrouque con remolque de dos ejes
2S3		Tractocamión de dos ejes con semirremolque de tres ejes	3 R3		Camión de tres ejes Doblétrouque con remolque de tres ejes
3S1		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de un eje	4 R2		Camión de cuatro ejes con remolque de dos ejes
3S2		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de dos ejes	4R4		Camión de cuatro ejes con remolque de cuatro ejes
3S3		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de tres ejes			

Designación	Configuración	Descripción
2 B1		Camión de dos ejes con remolque balancín de un eje
2B2		Camión de dos ejes con remolque balancín de dos ejes
2B3		Camión de dos ejes con remolque balancín de tres ejes
3 B1		Camión de tres ejes Doblétrouque con remolque balancín de un eje
3B2		Camión de tres ejes Doblétrouque con remolque balancín de dos ejes
3B3		Camión de tres ejes Doblétrouque con remolque balancín de tres ejes
4B1		Camión de cuatro ejes con remolque balancín de un eje



Designación	Configuración	Descripción
4B2		Camión de cuatro ejes con remolque balancín de dos ejes
4B3		Camión de cuatro ejes con remolque balancín de tres ejes

Imagen 1 Clasificación de vehículos de carga en COLOMBIA, determinada en la Resolución 1782 de 2009

Fuente: <https://www.mintransporte.gov.co/Documentos/Normatividad/Resoluciones>

- Transporte: El transporte se refiere al movimiento de un producto de un lugar a otro en su recorrido desde el principio de la cadena de suministro hasta el cliente. (). Existen diferentes tipos de transporte, entre los cuales se encuentran: *Terrestre, Marítimo, Aéreo y de Tuberías*³⁷
- Transportista: Una empresa que transporta mercancías o personas por tierra,

³⁷ CHOPRA, Sunil & MEINDL, Peter. Administración de la cadena de suministro. Madrid: Pearson Education. 2008, 552p

mar o aire³⁸

- Unidad de Negocio: Una parte de una organización que se gestiona como un negocio independiente con su propio informe de pérdidas y ganancias. Por ejemplo, en el grupo General Motors Chevrolet es una unidad de negocio³⁹

2.2. Marco Teórico

En esta sección se aborda en qué consiste la planeación logística estratégica, cuáles son sus principales objetivos y la importancia del diseño de la red logística en la misma. Se analiza el problema de la ubicación de las locaciones en la configuración de la red logística y cuáles son los principales métodos para su resolución. Se presentan varios de estos métodos que consisten en modelos matemáticos de optimización, de simulación y heurísticos. Por último se justifica la decisión de utilizar el modelo matemático de programación lineal entera mixta para diseñar la red de distribución de la empresa en estudio.

2.2.1. La planeación estratégica de la logística y el problema de la configuración de la red.

En el presente segmento se describen los diferentes niveles de la planeación logística y cuál es el objetivo de cada uno, se expone cual es el nivel que aborda esta investigación y por ende el objetivo de la misma. También se expone como está configurada una red típica de flujo de producto o red de distribución y cuál es el principal problema en la configuración de estas redes.

³⁸ Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP). Op.Cit. p. 29

³⁹ Ibid. p. 26

2.2.1.1. Estrategia y planeación de la logística y de la cadena de suministros.

La selección de una adecuada estrategia logística y de la cadena de suministro requiere algo del mismo proceso creativo necesario para desarrollar una adecuada estrategia corporativa. Los enfoques innovadores en la estrategia logística y de la cadena de suministro pueden representar una ventaja competitiva. Se ha dicho que una estrategia logística cuenta con tres objetivos: reducción de costo, reducción de capital y mejora del servicio.⁴⁰

La planeación logística trata de responder las preguntas qué, cuándo y cómo, y tiene lugar en tres niveles: estratégica, táctica y operativa. La principal diferencia entre ellas es el horizonte de tiempo para la planeación.

En la planeación estratégica se manejan decisiones que tienen un alto impacto en la organización, tienen horizontes de planificación de largo plazo y una alta inversión, como lo son:

- Localización de plantas y bodegas
- Planificación de la capacidad
- Flujo que pasa a través de la red logística

En la planeación táctica se manejan decisiones que pueden ser tomadas cada semana, mes, trimestre o semestre. El horizonte de planificación es de máximo un año. Entre ellas encontramos:

- Políticas de Inventario
- Estrategias de Transporte

⁴⁰ Ronald H. Ballou (2004) (p. 35-36). Logística: administración de la cadena de suministro. Pearson Education.

En la planeación operacional se manejan decisiones que deben ser tomadas día a día, como son:

- Secuenciamiento de tareas (Scheduling)
- Ruteo de vehículos
- Carga de camiones⁴¹

Esta investigación se centra en lo referente a la planeación estratégica logística de la empresa Químicos S.A, cuyo objeto será diseñar la nueva red logística de la empresa, indicando la ubicación de instalaciones, las respectivas capacidades requeridas y el flujo de los productos a través de la red.

2.2.1.2. El problema de la configuración de la red.

El problema de la configuración de la red es el relativo a la especificación de la estructura a través de la cual fluyen los productos desde sus puntos de origen hacia los puntos de demanda. Esto implica la determinación de las instalaciones que se utilizarán, si existen; el número y ubicación de ellas; los productos y clientes asignados a ellas; los servicios de transporte utilizados entre ellas; el lugar de origen, las actividades entre instalaciones y la distribución hacia los flujos de productos de los clientes; así como los niveles de inventario que se mantienen en las instalaciones. En la imagen 2 se muestra una red de flujo generalizado de producto, donde la demanda puede atenderse desde almacenes de campo o directo desde puntos de origen, tales como plantas, proveedores o puertos. Los almacenes de campo, a su vez, son atendidos por almacenes regionales o directos desde puntos de origen. Este problema puede representarse en una variedad de formas donde pueden existir más o menos niveles que los mostrados en la imagen 2, y

⁴¹ Ibid. p.38

donde pueden existir diferentes configuraciones, dependiendo de las características de los productos que fluyen a través de la red. Es decir, puede haber más de un diseño de red para los productos de una compañía⁴².

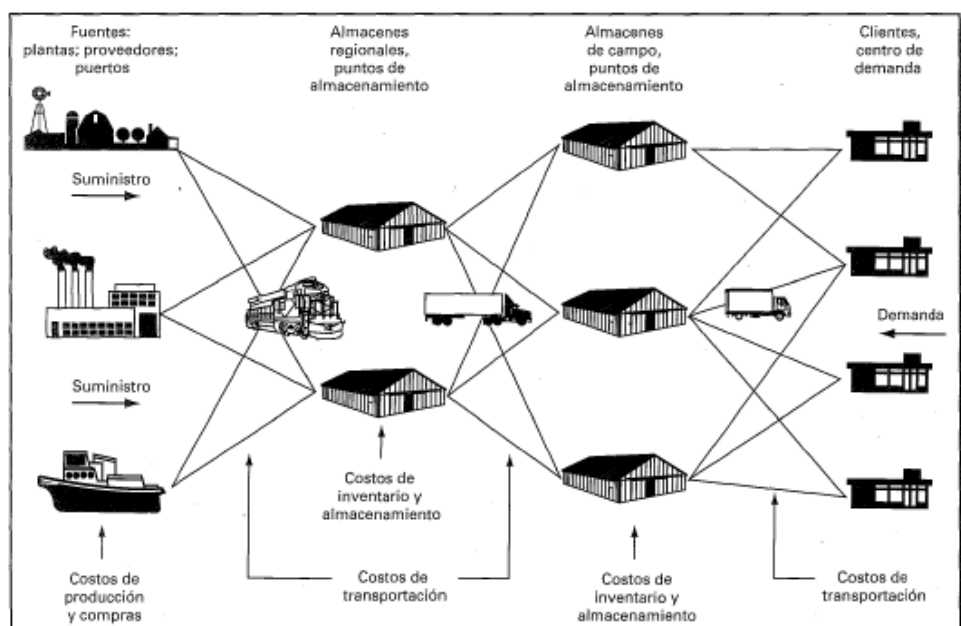


Imagen 2. Red generalizada de flujo de producto.

Fuente: Ronald H. Ballou (2004) (p.620). *Logística: administración de la cadena de suministro*. Pearson Education.

La búsqueda de asignaciones de costos más bajos, o en forma alternativa, las asignaciones de utilidad máxima, son la esencia de la estrategia de ubicación de instalaciones.

Para el caso objeto de investigación, el problema del diseño de la red involucra definir la ubicación de más de dos instalaciones de forma simultánea en todo el territorio colombiano, con el fin de reducir los costos asociados. Este es una situación muy común que se desarrollará en el siguiente numeral.

⁴² Ibid. p.619

2.2.1.3. Ubicación de múltiples instalaciones

El problema de ubicación más complejo, y más realista, para la mayoría de las empresas se presenta cuando deben ubicarse dos o más instalaciones en forma simultánea, cuando se ubicarán instalaciones adicionales y al menos una ya existe. Este problema es común debido a que todas las compañías, con excepción de las pequeñas, cuentan con más de una instalación dentro de su sistema logístico. Resulta complejo porque estas instalaciones no pueden manejarse de manera razonable como económicamente independientes, y el número de posibles configuraciones de ubicación se vuelve enorme⁴³

Ahora veamos el problema de ubicación del almacén como una forma general, ya que es un problema común que enfrentan muchos tipos de negocios. Puede tipificarse mediante varias preguntas básicas de planeación:

- ¿Cuántos almacenes deberán existir en la red de cadena de suministros? ¿Qué tan grande deberán ser, y dónde deberán ubicarse?
- ¿Cuáles puntos de demanda deberán asignarse a un almacén? ¿Cuáles almacenes deberán asignarse a cada planta, proveedor o puerto?
- ¿Qué productos deberán manejarse dentro de cada almacén? ¿Qué productos deberán enviarse directo desde las plantas, proveedores o puertos hacia los clientes?

Se han desarrollado varios métodos de ubicación que ayudan a responder a todas o algunas de las preguntas anteriores.⁴⁴ En la siguiente sección se presentan algunos de ellos.

⁴³ Ibid. p.562

⁴⁴ Ibid. p.563

2.2.2. Métodos matemáticos para resolver problemas de ubicación de locaciones

En esta sección se describen varios de los métodos matemáticos que ayudan a resolver el problema de ubicación de las instalaciones en una red de distribución. Estos métodos matemáticos de ubicación se catalogan como exactos o de optimización, de simulación y heurísticos. A continuación se explican cada uno de ellos, aunque sin intentar realizar una explicación exhaustiva, sólo con el objetivo de exponer la variedad y la funcionalidad de cada tipo. Seguidamente se presentan las ventajas del modelo de programación lineal entera mixta de acuerdo a una variedad de autores, lo cual sirve como base para justificar la decisión de utilizar el modelo matemático de programación lineal entera mixta para diseñar la red de distribución de la empresa en estudio.

2.2.2.1. Métodos exactos o de optimización

Los métodos exactos se refieren a aquellos procedimientos con la capacidad de garantizar una solución matemática óptima al problema de ubicación, o al menos una solución de precisión conocida. En muchos aspectos, este es un método ideal para el problema de la ubicación; sin embargo, el método puede provocar largos tiempos de ejecución de cómputo, amplios requerimientos de memoria y una definición comprometida del problema cuando se aplique a problemas prácticos⁴⁵. Los modelos de cálculo y de programación matemática son ejemplos de este método, y ambos se ilustrarán a continuación

Método del múltiple centro de gravedad

⁴⁵ Ibid. p.563

Al usar el método exacto de centro de gravedad en un formato de multiubicaciones se observa la naturaleza del problema de ubicación de múltiples instalaciones. Recuerde que este es un modelo basado en Cálculo que obtiene la solución de mínimo costo de transportación para una instalación intermedia ubicada entre los puntos de origen y de destino. Si se localiza más de una instalación, entonces es necesario asignar los puntos de origen y destino a ubicaciones arbitrarias. Esto forma grupos de puntos iguales al número de instalaciones que se necesitan ubicar. Luego, se obtiene una ubicación exacta de centro de gravedad para cada uno de los grupos. Estas asignaciones a las instalaciones pueden realizarse en muchas formas, en especial cuando se consideran múltiples instalaciones y un gran número de puntos de origen y de destino dentro del problema. Un método es formar los grupos uniendo los puntos que estén más cercanos entre sí. Una vez que se obtuvieron las ubicaciones de centro de gravedad, los puntos se reasignan a estas ubicaciones. Se encuentran las nuevas ubicaciones de centro de gravedad para los grupos revisados. El proceso continúa hasta que no exista más cambio. Esto finaliza los cálculos para el número especificado de instalaciones que se ubicarán. Puede repetirse para distinto número de instalaciones.

A medida que se incrementa el número de instalaciones, es común que los costos de transportación disminuyan. Las desventajas de estos costos de transportación decrecientes son los incrementos en los costos fijos totales y en los costos del sistema de manejo de inventarios. La mejor solución es la que minimice la suma de todos estos costos. Aunque este método es óptimo si se evalúan todas las formas de asignar puntos a los grupos, se vuelve computacionalmente impráctico para problemas de tamaño realista. La asignación de muchos clientes a un incluso pequeño número de instalaciones es una enorme tarea combinatoria.⁴⁶

⁴⁶ Ibid. p.564

Programación lineal entera mixta

Es la metodología más popular utilizada en los modelos comerciales de ubicación. El principal beneficio relacionado con la programación lineal entera mixta, beneficio que no siempre ofrecen otros métodos, es su capacidad para manejar costos fijos en forma óptima. Son bien conocidas las ventajas de la programación lineal entera mixta en relación con la asignación de demanda a través de la red, que es el centro de dicho método. Aunque la optimización es muy atractiva, también lo es el precio. A menos que se exploren características especiales de un problema particular, el tiempo computacional puede resultar largo y haber requerimientos sustanciales de memoria. No hay garantía de lograr solución óptima a menos que se evalúen todas las alternativas posibles. Incluso si se encontrara la solución óptima, pueden ocurrir ligeros cambios en los datos que den lugar a movimientos subsecuentes que requieran bastante tiempo de computadora.⁴⁷

2.2.2.2. Métodos de simulación

Aunque pueda parecer que los modelos de ubicación que proporcionan soluciones óptimas desde un punto de vista matemático son los mejores, debe recordarse que la solución óptima al problema real de ubicación no es mejor que la descripción del modelo de las realidades del problema. Además, tales modelos de optimización con frecuencia son difíciles de entender y requieren habilidades técnicas que muchos gerentes no poseen. Por esto, los defensores que demandan que una descripción precisa del problema sea la principal prioridad, con frecuencia dependen de la simulación como el método de planeación seleccionado. Prefieren arriesgarse encontrando una mejor solución pero subóptima a un problema descrito con precisión, que una solución óptima para una descripción de problema aproximada. Una característica valiosa inherente en ellos es su habilidad para manejar los

⁴⁷ Ibid. p.564

aspectos relativos al tiempo del inventario junto con los aspectos geográficos de la ubicación. Por otro lado, los requerimientos de información masiva y los largos tiempos de ejecución de computadora pueden ser un problema para esta metodología. Sin embargo, las descripciones precisas de la realidad son los principales motivos de su atractivo. Un problema importante con los simuladores de ubicación es que el usuario tal vez no sepa lo cercano que las configuraciones de almacén elegidas se encuentren del óptimo. Naturalmente, sabemos que la curva de costo total para el problema de ubicación por lo general tiene "una base plana". Por ello, los costos entre alternativas calificadas muy cercanas cambian poco dentro de la región óptima. En la medida en que se haya evaluado un número razonable de configuraciones cuidadosamente seleccionadas, podemos tener un alto grado de confianza de que al menos se habrá obtenido una solución satisfactoria.

2.2.2.3. Modelos heurísticos

Los modelos heurísticos son un tipo de mezcla entre el realismo en la definición de un modelo que puede obtenerse mediante los modelos de simulación, y la búsqueda de las soluciones óptimas obtenidas por los modelos de optimización. Generalmente alcanzan una amplia definición del problema, pero no garantizan soluciones óptimas para el mismo. Los modelos se construyen alrededor del concepto de heurística que Hinkley Kuehn define como "Un proceso abreviado de razonamiento... que busca una solución satisfactoria en vez de una óptima. La heurística, que reduce el tiempo invertido en la búsqueda de la solución de un problema, incluye una regla o un procedimiento computacional, que restringe el número de alternativas de solución a un problema con base en el proceso análogo humano de prueba y error para alcanzar soluciones aceptables a los problemas para los cuales no se encuentran disponibles algoritmos de optimización". La modelación heurística es un método práctico para algunos de los problemas logísticos más difíciles. La heurística es útil cuando se desea que el modelo busque una mejor solución, pero se comprometerían demasiadas cosas si se intentara

resolver el problema por métodos de optimización. Con frecuencia utilizamos la heurística en la planeación, donde ésta puede presentarse como principios o conceptos⁴⁸

2.2.2.4. Ventajas del uso de los modelos de optimización

Autores como Power exponen las ventajas de los modelos de optimización sobre los diferentes modelos matemáticos. Power responde a la siguiente pregunta, ¿Cuándo deben utilizarse modelos de optimización? De la siguiente manera: "...dondequiera y cuando sea posible".⁴⁹ Y adiciona varias ventajas del método de optimización:

- Se garantiza que el usuario tendrá la mejor solución posible para un conjunto dado de supuestos e información. .. Muchas estructuras complejas de modelo ahora pueden manejarse en forma correcta.
- Se realiza un análisis más eficiente, ya que todas las alternativas se generan y se evalúan.
- Se pueden efectuar comparaciones una y otra vez, ya que se garantiza la mejor solución para cada una.
- Los ahorros de costos o utilidades entre una solución óptima y una generada en forma heurística pueden ser importantes.⁵⁰

Otros autores como Davila, J., Ramirez, Luis,⁵¹ ha realizado investigaciones donde se pretende desarrollar herramientas basadas en los modelos de optimización de modelación dinámica y programación lineal entera mixta entera que dé soporte a los administradores de organizaciones locales al diseñar un plan de abastecimiento, que permita optimizar los costos de la cadena global, maximizando sus niveles de

⁴⁸ Ibid. p.647

⁴⁹ Richard F. Powers, "Optimization Models for Logistics Decisions", Journal of Business Logistics, Vol. 10, Núm. 1 (1989), pág. 106.

⁵⁰ Ibid, p. 111-115.

⁵¹ Davila, J., Ramirez, Luis (2012). Modelo matemático para la optimización de una cadena de suministro global con consideraciones de cupos de compra y periodos de pago. El Hombre y la Máquina. N° 38. p.7

servicio. En esta misma investigación los autores presentan un estado del arte revisado (Tabla 7) en donde se puede observar cómo en las últimas décadas muchas investigaciones han intentado modelar cadenas de suministro y redes de distribución por medio de modelos de optimización. En esta tabla se consolidan el tipo de modelo, la naturaleza del modelo, la función objetivo y las restricciones usadas en cada investigación. Siendo preponderante el uso de la programación lineal entera mixta como modelo matemático.

Autores Año	Producción y envío de productos	Selección de proveedores	Consideración de inventarios	Elementos de carácter finan- ciero	Tipo de modelo	Naturaleza	Función objetivo	Restricciones
Ehap y Beamon (2000)	X	X	X	Ninguna	Modelos multiobje- tivo con submodelos enteros mixtos y de inventarios	Determinístico a nivel estratégico, y estocástico a nivel operativo y multiperiodo	Minimización de costos	Materia prima, demanda, niveles de satisfacción, capacidades
Lowe <i>et ál.</i> (2002).	X			Tasas de cambio, riesgo y valor presente neto	Modelos de simulación	Estocástico multiperiodo	Minimización de costos	Capacidad, transporte y demanda
Hadjinicola y Kumar (2002).	X		X	Ninguno	Modelo descriptivo	Determinístico un solo periodo	NA	NA
Y. J. Jang <i>et ál</i> (2002).	X	X		Ninguno	Modelos enteros mixtos -submodelos	Determinístico un periodo	Minimización de costos	Capacidad, BOM, demanda, transporte
A Cakravastia <i>et ál</i> (2002)	X	X		Ninguno	Entero mixto lineal	Determinístico un periodo	Minimización del nivel de no satisfacción	Balance de material, tamaño de órdenes, tiempo de envío y precios.
E. Perea López <i>et ál.</i> (2003)	X		X	Ninguno	Entero mixto lineal	Determinístico multiperiodo	Maximización de la utilidad	Balance de material, BOM, satisfacción de demanda
Nagurney <i>et ál.</i> (2003)	X			Precios de transferencias y tasas de cambio	Modelo de desigualdad variacional	Estocástico	Maximizar ganancias	Costos de producción, pedidos del clientes, transacciones, tasa de cambio
Hongyan <i>et ál.</i> (2007)	X			Ninguno	Entero mixto lineal	Determinístico multiperiodo	Maximizar utilidades	Capacidades, transporte y distribución, fill rates, balances de productos en CD, inventarios.

Autores Año	Producción y envío de productos	Selección de proveedores	Consideración de inventarios	Elementos de carácter finan- ciero	Tipo de modelo	Naturaleza	Función objetivo	Restricciones
Sousa R <i>et al.</i> (2007).	X	X		Valor presente neto	Entero mixto lineal	Determinístico multiperiodo	Maximizar el valor presente	Capacidades de producción, balance de masa, ventas y demanda no servida.
Tsiakis P <i>et al.</i> (2007)	X		X	Ninguno	Entero mixto lineal	Determinístico	Minimización de costos	Capacidad de almacenamiento, transporte y distribución, balances de productos
Farkas T <i>et al.</i> (2008)	X		X	Ninguno	Entero mixto lineal	Determinístico	Minimización de costos	Capacidad de producción, transporte,
Xu y Nozick (2009)		X		Ninguno	Entero mixto	Estocástico	Minimización de costos	Transporte, número de proveedores, plan de compras.
Perron <i>et al.</i> (2009)	X	X	X	Precios de transferencias	Bilineal	Estocástico	Maximizar ganancias	Impuestos, localización, transporte, capacidad proveedores, demandas, BOM
Corsano y Montagna (2010)	X		X	Ninguno	Entero mixto lineal	Determinístico	Minimización de costos	Balance de materiales entre plantas y almacenes, unidades productivas
Rodríguez y Vecchietti (2010)			X	Ninguno	Programación lineal	Maximizar utilidades	Maximizar utilidades	Satisfacción de demanda, niveles de inventario, costos de compras

Tabla 7 Estado de arte revisado

Fuente: Davila, J., Ramirez, Luis (2012). *Modelo matemático para la optimización de una cadena de suministro global con consideraciones de cupos de compra y periodos de pago. El Hombre y la Máquina. N° 38*

Al ser la programación lineal entera mixta la metodología más popular utilizada en las investigaciones de modelamiento de redes de suministros y/o logísticas, se selecciona esta como la herramienta más prometedora para desarrollar el diseño de la red de distribución para la empresa Químicos Colombia S. A

2.2.3. Metodología para resolver un problema mediante programación lineal entera mixta

Los modelos matemáticos de optimización, como la programación lineal y lineal entera mixta, corresponden a algoritmos a través del cual se resuelven situaciones reales en las que se pretende identificar y resolver dificultades para aumentar la productividad respecto a los recursos (principalmente los limitados y costosos),

aumentando así los beneficios. El objetivo primordial de estos algoritmos es optimizar, es decir, maximizar o minimizar funciones lineales en varias variables reales con restricciones lineales (sistemas de inecuaciones lineales), optimizando una función objetivo también lineal⁵².

Mediante un problema de programación lineal entera mixta se pueden modelar situaciones donde se debe minimizar una función lineal sujeta a un conjunto de restricciones, también lineales, donde algunas, o todas, las variables sólo pueden tomar valores enteros. Un problema de programación lineal entera mixta (PEM) puede ser formulado de la siguiente manera:

Minimizar:

$$\sum_{j \in I} C_j X_j + \sum_{j \in C} C_j X_j$$

Sujeto a

$$\sum_{j \in I} a_{ij} X_j + \sum_{j \in C} a_{ij} X_j \leq b_i \quad i = 1, \dots, n$$

$$X_j \in Z_+ \quad \forall j \in I$$

$$X_j \in R_+ \quad \forall j \in C$$

donde I es el conjunto de variables enteras y C es el conjunto de variables continuas

Los supuestos en que se basa la Programación Lineal y que ayudan a concluir sobre la formulación presentada de un problema son:

- Proporcionalidad. Implica que la función objetivo Z, la cual queda reducida a $Z = \sum C_r X_r$ y la utilización de cada recurso que sería $\sum A_{ir} X_r$ ($i = 1, 2, \dots, m$), son directamente proporcionales al valor de la actividad r determinada.

⁵² Investigación de Operaciones. Programación Lineal. Recuperado de:
<https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial>

- Aditividad. Dados los niveles de actividad, el uso total de cada recurso y el valor resultante de Z deben igualar la suma correspondiente a las cantidades generadas por el valor de cada actividad.
- No negatividad. El resultado de cada una de las variables de decisión en la solución óptima debe ser positivo. Cuando se presentan variables negativas, éstas se deben expresar como la adición de variables positivas.
- Optimalidad. En algunos casos las variables reales que describen las actividades tienen sentido únicamente con valores enteros; debemos tener en cuenta que en Programación Lineal se aceptan valores reales positivos⁵³.

El primer paso para la resolución de un problema de programación lineal, o lineal entera mixta consiste en la identificación de los elementos básicos de un modelo matemático, estos son:

- Función Objetivo
- Variables
- Restricciones

El siguiente paso consiste en la determinación de los mismos, para lo cual se propone seguir la siguiente metodología:



Imagen 3 Metodología para resolver un problema mediante programación lineal

Fuente: Investigación de Operaciones. Programación Lineal. Recuperado de: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial>

⁵³ Guillermo J. Lozano (2009) (pp. 71). Optimización. Universidad Nacional de Colombia.

2.2.3.1. La función objetivo

La función objetivo tiene una estrecha relación con la pregunta general que se desea responder. Sí en un modelo resultase distintas preguntas, la función objetivo se relacionaría con la pregunta del nivel superior, es decir, la pregunta fundamental. Así por ejemplo, si en una situación se desean minimizar los costos, es muy probable que la pregunta de mayor nivel sea la que se relacione con aumentar la utilidad en lugar de un interrogante que busque hallar la manera de disminuir los costos⁵⁴.

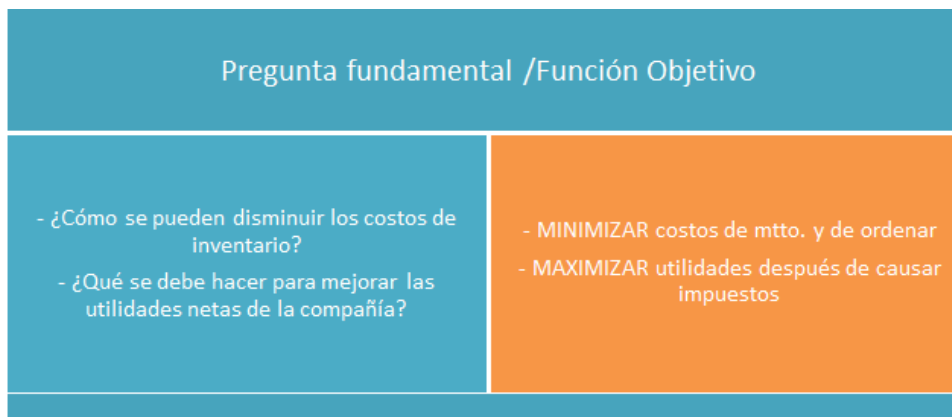


Imagen 4 Relación entre la pregunta fundamental del problema y la función objetivo

Fuente: Investigación de Operaciones. Programación Lineal. Recuperado de:
<https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial>

2.2.3.2. Las variables de decisión

Similar a la relación que existe entre objetivos específicos y objetivo general se comportan las variables de decisión respecto a la función objetivo, puesto que estas

⁵⁴ Investigación de Operaciones. Programación Lineal. Recuperado de:
<https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial>

se identifican partiendo de una serie de preguntas derivadas de la pregunta fundamental. Las variables de decisión son en teoría factores controlables del sistema que se está modelando, y como tal, estas pueden tomar diversos valores posibles, de los cuales se precisa conocer su valor óptimo, que contribuya con la consecución del objetivo de la función general del problema⁵⁵. Desde el punto de vista funcional se pueden clasificar en variables independientes o principales y variables dependientes o auxiliares, aunque matemáticamente todas son iguales.

2.2.3.3. Las restricciones

Cuando se habla de las restricciones en un problema de programación lineal, se refiere a todo aquello que limita la libertad de los valores que pueden tomar las variables de decisión.

La mejor manera de hallarlas consiste en pensar en un caso hipotético en el que se decide darle un valor infinito a las variables de decisión, por ejemplo, ¿qué pasaría si en un problema que precisa maximizar sus utilidades en un sistema de producción de calzado se decide producir una cantidad infinita de zapatos? Seguramente ahora surgirían múltiples interrogantes, como por ejemplo:

- ¿Con cuánta materia prima cuento para producirlos?
- ¿Con cuánta mano de obra cuento para fabricarlos?
- ¿Pueden las instalaciones de mi empresa albergar tal cantidad de producto?
- ¿Podría mi fuerza de mercadeo vender todos los zapatos?
- ¿Puedo financiar tal empresa?⁵⁶

Pues bueno, entonces se habría descubierto que el sistema presenta una serie de

⁵⁵ Investigación de Operaciones. Programación Lineal. Recuperado de:
<https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial>

⁵⁶ Investigación de Operaciones. Programación Lineal. Recuperado de:
<https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial>

limitantes, tanto físicas, como de contexto, de tal manera que los valores que en un momento dado podrían tomar las variables de decisión se encuentran condicionados por una serie de restricciones.

2.2.3.4. Lenguaje de modelado

A menudo los problemas de modelación matemática están constituidos por innumerables variables, lo cual dificulta su resolución manual, es por esto que se recurre a lenguajes de modelados. De acuerdo a su complejidad se tiene las siguientes alternativas:

- *Lenguajes de programación de propósito general* (C, C++, Visual Basic). Estos llaman a una biblioteca de optimización. Requieren de un tiempo de desarrollo muy elevado y, sobre todo, presenta una gran dificultad y consumos de recursos para el mantenimiento del código. Tienen sentido cuando el tiempo de solución es crítico o el modelo es ejecutado con mucha frecuencia o cuando el modelo tiene que ser integrado en otra aplicación.
- *Lenguajes o entornos de cálculo numérico o simbólico* (hojas de cálculo, Solver, Matlab, Maple). Como ventajas específicas se pueden mencionar: su facilidad de uso, facilidad de presentación de resultados en gráficos. Sin embargo, no inducen una buena práctica de programación, presentan dificultad en su desarrollo, verificación, validación, actualización, documentación y en general no permiten modelar problemas complejos o de gran tamaño. Son difícilmente utilizables cuando se plantean problemas de optimización de tamaño medio o superior.
- *Lenguajes algebraicos de modelado*. Son las alternativas más complejas y potentes por su capacidad de indexación de las variables y ecuaciones, permiten cambiar sin dificultad las dimensiones del modelo, de forma natural

separan datos de resultados. Permiten la detección de errores de consistencia en la definición y verificación del modelo. Entre los más conocidos se pueden mencionar GAMS (www.gams.com), AMPL (www.ampl.com) y MPL (www.maximalsoftware.com). No son adecuados para la resolución de problemas de pequeño tamaño por parte de usuario esporádicos por la barrera de entrada que supone el aprendizaje de un nuevo lenguaje⁵⁷.

Este capítulo abordó los principales objetivos de la planeación logística estratégica y la importancia de la configuración de la red logística de una empresa para lograr una ventaja competitiva en el mercado. Dentro de esta planeación estratégica la decisión de la ubicación de instalaciones juega un papel importante en el costo total de la cadena, siendo este el principal problema a resolver en la configuración de la red. Para la resolución de este problema se han desarrollado varios métodos de ubicación. Los métodos expuestos fueron los modelos matemáticos. Dentro de los cuales diversos autores exponen las ventajas de los modelos de optimización y se evidencia el amplio uso de la programación lineal entera mixta como una aproximación adecuada para resolución del problema de la ubicación de instalaciones. Por esta razón se escoge la programación lineal entera mixta como la herramienta para realizar el diseño de la red de distribución para la empresa Químicos Colombia S. A.

Una vez definido el uso de un modelo matemático de programación lineal entera mixta para el desarrollo de esta investigación, el siguiente capítulo se centrará en los distintos aspectos metodológicos que conforman el diseño de la red.

⁵⁷ Ramos, A., Sanchez, P. (Septiembre, 2010). Modelos matemáticos de optimización. Recuperado de: https://www.gams.com/fileadmin/community/contrib/doc/modelado_en_gams.pdf

3. CAPITULO III. DISEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN

En este capítulo se realiza la caracterización de la actual red de distribución de la empresa Químicos Colombia S.A, especificando como está distribuida la demanda en las diferentes regiones del país, detallando los requerimientos especiales y las restricciones de la red de distribución. Adicionalmente se identifican los flujos no óptimos e ineficiencias logísticas presentes en la actual red de distribución. Seguidamente se desarrolla el modelo de programación lineal entera mixta describiendo cada uno de sus elementos básicos: función objetivo, parámetros y variables de decisión y restricciones.

3.1. Caracterización del proceso de distribución actual

La distribución actual de los productos que comercializa la empresa Químicos Colombia S.A. se realiza de forma directa a los clientes desde la planta de producción localizada en Cartagena y a través de un centro de distribución en Medellín o desde una bodega en Bogotá. Cerca del 80% de la producción de la planta de Cartagena es para el mercado colombiano y se despacha al centro de distribución en Medellín y/o directamente a los clientes finales. El 100% de los productos que importa Químicos Colombia SA llegan por los puertos Cartagena y Barranquilla, y posteriormente son trasladados al centro de distribución en Medellín. Del centro de distribución en Medellín se despacha el producto directamente a los clientes y también a la bodega ubicada en Bogotá. En la bodega de Bogotá se recibe producto solamente proveniente del centro de distribución en Medellín que luego es despachado a los clientes finales. En la siguiente imagen se diagrama la red de distribución anteriormente descrita:

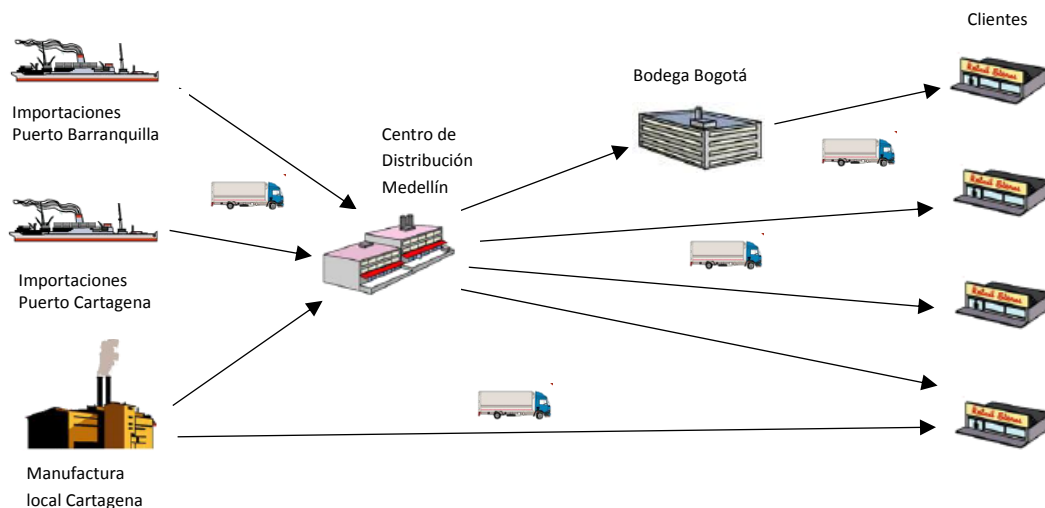


Imagen 5. Red de distribución actual de Químicos Colombia S.A.

Fuente: Elaboración propia.2017.

3.1.1. Análisis distribución de la demanda actual

Con el fin de determinar la distribución de la demanda actual de los clientes de Químicos Colombia S.A. en el territorio colombiano, se analizaron todos los despachos realizados en el año inmediatamente anterior (año 2016); se incluyeron en el análisis los despachos de producto empacado de los negocios dentro del alcance de este proyecto. Esta información se obtuvo del sistema ERP de la compañía. Seguidamente se hizo uso del programa OpenHeatMap, disponible de manera gratuita en la web, para representar con un diagrama de mapa de calor la distribución de la demanda.

En la imagen 7 se muestra la distribución de la demanda en las diferentes regiones, representadas por círculos, cuyo tamaño es proporcional a la cantidad de la demanda. De acuerdo a esto se evidencia que la mayor concentración de la demanda se encuentra entre los departamentos de Cundinamarca y de Antioquia; seguidos de los departamentos del Valle del Cauca y Cauca; también se evidencia

una pequeña porción de la demanda en la costa norte del país (Cartagena y Barranquilla). Finalmente se identifican pequeños volumen en Santa Marta (Magdalena), Bucaramanga (Santander) e Ibagué (Tolima).

Toneladas por departamento



Imagen 6. Mapa de calor de la demanda en Colombia

Fuente. Elaboración propia con uso software Openheatmap.2017

En la tabla 8, se encuentra detallado el volumen transferido en el año 2016, desde cada una de las bodegas hacia las diferentes regiones destino. Del análisis de los datos de esta tabla, se evidencia lo siguiente:

- El mayor porcentaje de la demanda lo tiene el centro del país (Cundinamarca) con un 46%, que corresponde a 2,261 toneladas, seguido de Antioquia con un 37% correspondiente a 1798 toneladas. A pesar de esto

el centro de distribución principal está ubicado en la ciudad de Medellín.

	Destino								
Negocio/Locación	Antioquia	Atlántico	Bolívar	Cauca	Cundinamarca	Magdalena	Santander	Valle del Cauca	Total
Planta Cartagena	1,247		68,585	1,247	8,419				79,498
Bodega Dow Medellín	439,700	34,500		469,575	500,218			151,242	1,595,235
Bodega R&H Medellín	1,272,851	26,500			1,593,195	2,740	44,000	26,240	2,965,526
Terminal Barranquilla	84,550	26,000			159,480	860		12,850	283,740
Total	1,798,348	87,000	68,585	470,822	2,261,312	3,600	44,000	190,332	4,923,999

Tabla 8. Volumen en Kg transferido desde las bodegas actuales a las diferentes regiones destino.

Fuente. Elaboración propia.2017

- De las 2261 toneladas que se comercializan en Cundinamarca, el 93% (2094 toneladas) provienen desde el centro de distribución en Medellín, es decir que este volumen es transportado desde la costa (Barranquilla o Cartagena) hasta el centro de distribución de Medellín para luego ser trasladado al centro del país (Santander, Cundinamarca), incurriendo en un costo del flete logístico 10% más alto que si se almacenara directamente en una bodega en el centro del país.
- Existen clientes ubicados en la costa caribe (Atlántico, Bolívar y Magdalena) cuyo suministro proviene del centro de distribución en Medellín. El 40% (63,600 kg de 159,000 kg) de la demanda de los clientes de la costa caribe, llega por los puertos de Cartagena y Barranquilla se traslada hacia el centro de distribución de Medellín para luego ser transportados devuelta hacia el norte del país.

Todo lo descrito anteriormente revela que existen flujos no óptimos e ineficiencias logísticas en la actual red de distribución.

3.1.2. Requerimientos especiales y restricciones del modelo

En la actual configuración logística existen dos negocios que realizan importación de productos con un nombre y etiqueta diferente al que se comercializa en Colombia, por tanto en la bodega que se almacena se debe realiza un servicio de

re-etiquetado. Debido a que este servicio puede ser suministrado en donde se solicite y, adicionalmente, se tomó la decisión de tomar el producto más representativo por cada unidad de negocio, entonces esta actividad no será impactada ante un eventual cambio, por lo que no es necesaria representarlo en el modelo. Básicamente el producto está disponible en la bodega y cuando entra una orden se re-etiqueta donde está ubicado, entonces esto no debe afectar la decisión de ubicación de las bodegas de la nueva cadena logística de Colombia.

El resto de los productos que entran en el alcance de este proyecto son todos compatibles entre ellos mismos y requieren exactamente las mismas condiciones de almacenamiento, es decir, pueden compartir bodega; esto facilita el desarrollo del modelo ya que le permitirá a los productos tener un flujo en cualquier dirección buscando minimizar los costos al tiempo que se satisface la demanda.

En conclusión no existen requerimientos especiales ni restricciones para los productos que entran en el alcance del proyecto.

Actualmente tenemos productos que son entregados directamente a los clientes sin pasar por una bodega pero para el modelo construido en este proyecto se asumirá que todo producto debe pasar por una bodega para poder definir una red logística desde el punto de vista estratégico que funcione para el mediano y largo plazo.

3.2. Elaboración modelo lineal de programación entera mixta

Para generar el modelo de optimización de la empresa Químicos SA se sigue la teoría de conocimiento y mejora continua de los procesos por ser pieza fundamental en la construcción de organizaciones más efectivas y rentables, ya que al poseer procesos adecuados para el tipo de operación se logra la correcta gestión y aprovechamiento de los mismos para contar con seguridad real y control de la capacidad de gestión en la compañía.

Al analizar los procesos actuales de la red de suministro en Colombia se pudo observar que posee falencias e ineficiencias que se reflejan en re-trabajos, transportes innecesarios y costos operacionales más altos. Con la caracterización de la operación y el entendimiento de la oportunidad capturada en este proyecto se procede a la elaboración de un modelo de programación lineal entera mixta para encontrar la red de distribución que le sirva a la compañía para los próximos 10 años de operaciones.

Este modelo de programación es enfocado en el nivel estratégico y por esta razón se consolida la demanda anual de la compañía para entender la dinámica del movimiento de sus productos, y así, tener la capacidad de tomar decisiones de largo plazo como lo es la apertura o cierre de una bodega de distribución. En el modelo propuesto se establece un horizonte de planificación de 12 meses.

Dada la gran cantidad de combinaciones posibles entre las locaciones de los almacenes, el número de clientes y cantidad de productos se procedió a hacer un análisis con el equipo comercial de la compañía con el fin de disminuir la complejidad del modelo sin que este perdiera pertinencia (las diferentes decisiones se explicarán más adelante en la presentación de parámetros y variables).

Como se indicó anteriormente el objetivo principal de este proyecto es diseñar una red de distribución que represente un ahorro en los costos de transporte y almacenamiento, por tanto lo que se quiere optimizar es el costo total de la red de distribución. A continuación se definen cada uno de los componentes de modelo de programación lineal entera que se desarrollará.

3.2.1. Definición de la función objetivo.

La función objetivo del modelo es la minimización de los costos relacionados con transporte y almacenamiento de la red de distribución teniendo en cuenta tres eslabones en la cadena: Punto de Origen, bodega y cliente.

Los costos de transporte definidos para la red de distribución de la empresa Químicos de Colombia S.A son los siguientes:

- El costo de transportar los productos de los puntos de origen (ya sea planta de Cartagena o los puertos de Barranquilla y/o Cartagena) hacia las bodegas
- El costo de entregar los productos de las bodegas hacia los clientes

Los costos relacionados con el almacenamiento están representados por:

- Costo Fijo de abrir una bodega
- Costo de almacenar los productos en las bodega
- Costo de inventario en tránsito entre la planta y las bodegas
- Costo de inventario en tránsito en las entregas a cliente

Es importante notar que sólo se está asumiendo un costo fijo de abrir una bodega y no uno de operación, la razón de esto es que con el proveedor con el que se cuenta se tiene una negociación en la que sólo se cobra por posición de estiba ocupada sin importar en que bodega este ubicado el producto. Tampoco se está considerando costo de almacenamiento en planta porque en ambos casos (Planta o Puerto) en la actualidad no se genera ningún costo adicional.

Por tanto el modelo de costos totales a minimizar sería el siguiente:

Costo anuales = Costo Fijo de abrir una bodega + Costo de transporte de Planta a bodega + Costo de entrega a clientes + Costo de inventario en tránsito entre planta y bodega + Costo de inventario en tránsito de entregas a clientes + Costo de almacenamiento en bodega

3.2.2. Identificación y definición de parámetros y variables de decisión

Para la formulación del modelo se define la siguiente notación:

i – Conjunto de plantas → Como se explicó en la sección anterior los productos pueden tener como origen la planta en Cartagena o un puerto en Cartagena pero dado el hecho de que las tarifas de transporte no cambian por la ubicación en la ciudad sino que está dada entre ciudades, es decir, un flete desde Cartagena hasta Medellín es fijo sin importar si la carga se recoge en el norte o sur de Cartagena, se decidió dejar un solo punto de origen llamado “Cartagena”.

Planta
Cartagena

Tabla 9 Plantas de producción

Fuente: Elaboración propia.2017.

j – Conjunto de bodegas → Siguiendo el mapa de calor creado en este proyecto (Imagen 6. Mapa de calor de la demanda en Colombia) se procedió a revisar con el operador logístico de la empresa Químicos SA si contaba con la capacidad de realizar una apertura de una bodega en estas ciudades. Esto se realizó con el fin de garantizar que el modelo contará con cotizaciones de precios reales que actualmente se están manejando en el mercado. Afortunadamente para este desarrollo el operador logístico cuenta con presencia nacional y se logró definir las siguientes posibles ubicaciones:

Bodega
Cartagena
Barranquilla
Medellín
Bogotá

Cali

Tabla 10 Ubicaciones de bodegas a evaluar por el modelo

Fuente: Elaboración propia.2017

k – Conjunto de clientes → Dado que cada cliente tiene una ubicación que lo hace único y le entrega al modelo la complejidad que este pretende resolver se decidió mantener el mayor número de clientes posibles. Para esto se realizó un Pareto por el volumen que cada cliente compra en el año y sólo se excluyeron clientes con una demanda inferior al 0.8% del total de la demanda anual (Con el fin de proteger la confidencialidad se decidió cambiar los nombres de los clientes):

Clientes	Ubicación
Cliente1	Medellín
Cliente2	Bogotá
Cliente3	Medellín
Cliente4	Bogotá
Cliente5	Caloto
Cliente6	Medellín
Cliente7	Bogotá
Cliente8	Bogotá
Cliente9	Yumbo
Cliente10	Cartagena
Cliente11	Barrancabermeja
Cliente12	Bogotá
Cliente13	Bogotá
Cliente14	Tocancipá
Cliente15	Bogotá
Cliente16	Medellín
Cliente17	Cali
Cliente18	Barranquilla

Tabla 11 Clientes en Colombia de la empresa Químicos SA

Fuente: Elaboración propia.2017

l – Conjunto de productos → La empresa químicos SA cuenta con un poco más de

40 productos que se distribuyen en cuatro grandes industrias: Arquitectura/Revestimiento, Construcción, Cuidado personal y del hogar y soluciones para confort. Para buscar una oportunidad de simplificación del modelo sin que perdiera pertinencia se realizaron varias revisiones con cada equipo comercial (ventas y marketing) de cada área de negocio, encontrando que todos los productos, por ser de uso industrial, tienen un comportamiento similar que está determinado por la industria en la que participan y, además, que siempre hay un producto estrella para cada industria. Teniendo en cuenta los dos puntos anteriores se decidió tener un solo producto por unidad de negocio con la tranquilidad de que se representaría de forma cercana la realidad de la compañía:

Producto
AC
CC
HIPC
PS

Tabla 12 Productos de la empresa Químicos SA

Fuente: Elaboración propia.2017

T_{ijl} – Costo de transporte unitario del producto l desde la planta i hacia la bodega $j \rightarrow$ Para el cálculo del costo por Kilogramo de cada producto se utilizó la capacidad promedio registrada en nuestras bases de datos teniendo en cuenta lo máximo que se puede cargar por la configuración de los productos que se manejan (Mayoritariamente son tambores en estibas o contenedores de granel intermedio IBC). Como todas estas rutas ya se encuentran en uso se tomaron los costos de los fletes registrados en el contrato que se tiene con el operador logístico.

Planta	Bodega	Costo x Kg (COP)
Cartagena	Cartagena	\$ 37.10
Cartagena	Barranquilla	\$ 117.65
Cartagena	Medellín	\$ 173.75

Cartagena	Bogotá	\$ 333.33
Cartagena	Cali	\$ 375.00

Tabla 13 Costo de transporte de la planta a la bodega por Kg

Fuente: Elaboración propia.2017

d_{jkl} – Costo de transporte unitario del producto l desde la bodega j hacia el cliente $k \rightarrow$ Para el costo de transporte entre la bodega y el cliente se procedió de la misma forma que en el transporte entre el punto de origen y las bodegas, con la diferencia que para las rutas que actualmente no se manejan y no se encuentran registradas en los contratos fue necesario solicitar cotizaciones con el operador logístico:

	Bodega				
	Cartagena	Barranquilla	Medellín	Bogotá	Cali
Cientes					
Cliente1	\$392.86	\$520.83	\$78.57	\$372.08	\$321.43
Cliente2	\$589.29	\$625.00	\$318.93	\$95.83	\$350.82
Cliente3	\$392.86	\$520.83	\$78.57	\$372.08	\$321.43
Cliente4	\$589.29	\$625.00	\$318.93	\$95.83	\$350.82
Cliente5	\$799.94	\$927.92	\$348.93	\$779.17	\$85.65
Cliente6	\$392.86	\$520.83	\$78.57	\$372.08	\$321.43
Cliente7	\$589.29	\$625.00	\$318.93	\$95.83	\$350.82
Cliente8	\$589.29	\$625.00	\$318.93	\$95.83	\$350.82
Cliente9	\$571.43	\$729.17	\$321.43	\$412.50	\$78.57
Cliente10	\$71.43	\$270.83	\$425.00	\$687.50	\$571.43
Cliente11	\$446.43	\$520.83	\$78.57	\$372.08	\$321.43
Cliente12	\$589.29	\$625.00	\$318.93	\$95.83	\$350.82
Cliente13	\$589.29	\$625.00	\$318.93	\$95.83	\$350.82
Cliente14	\$589.29	\$625.00	\$318.93	\$95.83	\$350.82
Cliente15	\$589.29	\$625.00	\$318.93	\$95.83	\$350.82
Cliente16	\$392.86	\$520.83	\$78.57	\$372.08	\$321.43
Cliente17	\$571.43	\$729.17	\$321.43	\$412.50	\$78.57
Cliente18	\$232.14	\$71.43	\$468.57	\$625.00	\$687.50

Tabla 14 Costo de transportar desde una bodega al cliente por Kg, en pesos colombianos

Fuente: Elaboración propia.2017

CW_{lj} – Costo de almacenar el producto l en la bodega $j \rightarrow$ Con el operador logístico se tiene pactada una tarifa de almacenamiento por estiba a nivel nacional, es decir, sin importar la ubicación de la bodega ellos cobran el mismo valor con el compromiso que ellos son los únicos aprobados para mover la carga. Se tomó el valor de peso promedio por estiba para calcular el costo por Kilogramo:

Bodega	Costo Almacenamiento x Kg (COP)
Cartagena	\$ 23,89
Barranquilla	\$ 23,89
Medellín	\$ 23,89
Bogotá	\$ 23,89
Cali	\$ 23,89

Tabla 15 Costo de almacenamiento por bodega por Kg

Fuente: Elaboración propia.2017

P_l = Precio del producto $l \rightarrow$ Para el precio se tomó el valor del producto más representativo por unidad de negocio:

Producto	Precio
AC	\$ 3,278
CC	\$ 4,836
HIPC	\$ 2,597
PS	\$ 5,474

Tabla 16 Precios de productos por Kg

Fuente: Elaboración propia.2017

$LT1_{ij}$ = Lead entre la planta i y la bodega j en días → En el sistema ERP de la empresa Químicos SA se tienen configuradas las rutas y por tanto se procedió a tomar los valores registrados en el sistema ERP

Planta	Bodega	Días
Cartagena	Cartagena	1
Cartagena	Barranquilla	1
Cartagena	Medellín	2
Cartagena	Bogotá	3
Cartagena	Cali	4

Tabla 17 Lead Time de transporte entre la planta y la bodega en días

Fuente: Elaboración propia.2017

$LT3_{jk}$ = Lead time del transporte entre la bodega j y el cliente k → Se procede igual que en el parámetro anterior con la diferencia que para las rutas que hoy en día no se encuentran en el sistema ERP fueron consultadas al operador logístico

	Bodega				
	Cartagena	Barranquilla	Medellín	Bogotá	Cali
Clientes					
Cliente1	2	2	1	2	2
Cliente2	3	3	2	1	2
Cliente3	2	2	1	2	2
Cliente4	3	3	2	1	2
Cliente5	5	5	3	3	1
Cliente6	2	2	1	2	2
Cliente7	4	4	2	2	1
Cliente8	3	3	2	1	2
Cliente9	4	4	2	2	1
Cliente10	1	1	2	3	4
Cliente11	2	2	2	2	3
Cliente12	3	3	2	1	2

Ciente13	3	3	2	1	2
Ciente14	3	3	2	1	2
Ciente15	3	3	2	1	2
Ciente16	2	2	1	2	2
Ciente17	4	4	2	2	1
Ciente18	1	1	2	3	4

Tabla 18 Lead del transporte entre la bodega y el cliente en días

Fuente: Elaboración propia.2017

R_l = Duración de meses del producto l en bodega j → En la empresa Químicos SA se lleva la métrica DSI (Days Sales of Inventory) que representa el tiempo promedio que el inventario se demora en ser vendido. Se procedió a consolidar un reporte en una base de datos interna para obtener el DSI de cada unidad de negocio con el fin de establecer el tiempo que un producto ocupa un espacio en bodega. Como la tarifa de almacenamiento es mensual se procedió a convertir el número en mes y redondear hacia arriba para reflejar el costo que actualmente se paga.

Producto	DSI	Meses
AC	59.86	2
CC	117.55	4
HIPC	39.35	2
PS	68.15	3

Tabla 19 Número de meses promedio que el producto pasa almacenado en bodega

Fuente: Elaboración propia.2017

a_{kl} – Demanda del cliente k para el producto l → Se tomó la demanda histórica del último año de cada cliente en cada producto.

Ciente/Producto	Demanda
Ciente1	
CC	1,036,050

Ciente2	
HIPC	796,860
Ciente3	
CC	405,000
AC	240,253
Ciente4	
AC	483,951
Ciente5	
PS	467,081
Ciente6	
AC	406,445
CC	20,000
Ciente7	
AC	329,647
CC	18,800
Ciente8	
PS	118,585
Ciente9	
PS	68,645
Ciente10	
PS	68,585
Ciente11	
AC	32,000
CC	4,000
Ciente12	
AC	35,808
Ciente13	
PS	30,597
Ciente14	
AC	23,714
CC	4,000
Ciente15	
PS	24,940
Ciente16	
HIPC	19,680
Ciente17	

HIPC	14,620
Ciente18	
AC	10,000

Tabla 20 Demanda de producto por cliente en Kg

Fuente: Elaboración propia.2017

W_j – Capacidad de la bodega j → Con el operador logístico se calculó la capacidad física disponible en KG. Para este cálculo se tomó el mismo valor de peso promedio por estiba utilizado en el cálculo del costo por kilogramo por posición de estiba. Para los casos donde no se cuenta con bodega actualmente el operador logístico realizó una revisión de mercado para determinar un tamaño de bodega que podría ofrecer.

Bodega	Capacidad(KG)
Cartagena	2'400,000
Barranquilla	2'400,000
Medellín	6'000,000
Bogotá	4'800,000
Cali	3'600,000

Tabla 21 Capacidad anual de las bodegas en KG

Fuente: Elaboración propia.2017

F_j – Costo Fijo de abrir la bodega j → Para la apertura de una bodega el operador logístico no se genera un cobro sino que ellos, por medio del contrato, aseguran la continuidad de la operación en ese punto por un número de años y, de no ser cumplido este tiempo de permanencia, unas multas por cierre antes del tiempo pactado. Por tanto para este caso se tomó el costo promedio (basado en los históricos) del proyecto de apertura de una nueva locación en el sistema ERP de la compañía. Para los casos donde el valor es cero es porque actualmente existe una bodega en esa ubicación y no se incurriría en este costo.

Bodega	Costo (COP)
--------	--------------

Cartagena	\$ -
Barranquilla	\$ 30,000,000
Medellín	\$ -
Bogotá	\$ -
Cali	\$ 30,000,000

Tabla 22 Costo de abrir una bodega en pesos colombianos

Fuente: Elaboración propia.2017

CP_l = Capacidad máxima de producción anual del producto l → Como hay productos producidos en la planta de Cartagena y otros importados se procedió a consultar en la respectiva planta de fabricación la capacidad productiva anual que se tiene para el producto representativo por unidad de negocio.

Producto	Capacidad anual en Kg
AC	2,300,000
CC	2,000,000
HIPC	1,500,000
PS	1,300,000

Tabla 23 Capacidad de producción para cada producto

Fuente: Elaboración propia.2017

Para determinar los costos asociados al almacenamiento y transporte se identificaron las siguientes variables de decisión:

X_{ijl} – Cantidad total de kilogramos del producto l despachado de la planta i hasta la bodega j .

Y_{jkl} – Cantidad total de kilogramos del producto l despachado de la bodega j hacia el cliente k

Z_j - { 1 si la bodega j es abierta
0 si la bodega j NO es abierta

3.2.3. Identificación y definición de las restricciones.

El modelo está sujeto a las siguientes restricciones:

Garantizar que la demanda de todos los productos de todos los clientes es satisfecha

$$\sum_j Y_{jkl} = a_{kl}, \forall k, l \quad (1)$$

Balance del flujo de producto entre las plantas y las bodegas

$$\sum_i X_{ijl} = \sum_k Y_{jkl}, \forall j, l. \quad (2)$$

Restricción de capacidad de producción de la planta por producto

$$\sum_i \sum_j X_{ijl} \leq CP_l, \forall l \quad (3)$$

- Restricción de capacidad en bodega

$$\sum_k \sum_l Y_{jkl} \leq W_j * Z_j, \forall j \quad (4)$$

- Restricciones de no negatividad

$$X_{ijl}, Y_{jkl} \geq 0 \quad (5)$$

- Restricciones de variables binarias para la apertura de bodegas

$$Z_j \in \{0, 1\} \quad (6)$$

La restricción (1) asegura que la demanda de los clientes por cada producto sea satisfecha. La restricción (2) garantiza el balance de flujo del sistema para que toda la demanda satisfecha del cliente sea cubierta por producto disponible en la bodega. La restricción (3) representa la capacidad productiva de la planta en términos de la cantidad de demanda que puede manejar. La restricción (4) representa la capacidad de almacenamiento de bodega en términos de cuanto producto puede almacenar. La restricción (5) garantiza la no negatividad de las variables de decisión (X_{ijl}, Y_{jkl}). La restricción (6) impone el comportamiento binario a la variable Z_j que determina la apertura de una bodega.

3.2.4. Planteamiento de la función objetivo

Finalmente la función objetivo del modelo que minimiza todos los costos asociados al transporte y almacenamiento, y sujeta a las restricciones anteriormente presentadas se define a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Costo total Anual} = & \sum_j F_j \times Z_j + \sum_i \sum_j \sum_l T_{ijl} \times X_{ijl} + \sum_j \sum_k \sum_l d_{jkl} \times Y_{jkl} \\ & + \sum_j \sum_k \sum_l CW_{jl} \times Y_{jkl} \sum_i \sum_j \sum_l (X_{ijl} \times LT1_{ij} \times P_l) \div 365 \\ & + \sum_j \sum_k \sum_l (Y_{ijl} \times LT3_{jk} \times P_l) \div 365 \end{aligned}$$

3.3. Programación en GAMS

Después de realizar las simplificaciones del modelo se determinó hacer uso de un lenguaje de modelado de cálculo numérico, específicamente el optimizador de hojas de cálculo de Microsoft Excel, Solver. Sin embargo debido al número de variables requeridas (más de 300), la herramienta Solver no contaba con la capacidad de procesarlo (capacidad máxima de 200 variables). Esto evidenció que el problema de optimización a pesar de las simplificaciones realizadas era de una complejidad media por lo que según lo descrito en el estado del arte podría ser solucionado con un lenguaje algebraico de modelado, en este caso específico se seleccionó GAMS (Sistema General de Modelaje Algebraico) debido a la disponibilidad de esta herramienta en las instalaciones de la Universidad del Norte

Una vez definido y confirmado que el software GAMS era adecuado para la solución del problema se procedió a correr modelo previamente desarrollado. Inicialmente el modelo fue programado de forma piloto con sólo los 6 principales clientes del Pareto para hacer pruebas de escritorio y validar que los cálculos y el planteamiento de las restricciones fuera correcto. Una vez el modelo corrió de forma exitosa encontrando una solución que satisface todas las restricciones se procedió a incluir la totalidad de los parámetros y correr el modelo en uno de los computadores de la institución educativa. Ver en anexo 1 el planteamiento del modelo MLP en GAMS. Los resultados obtenidos por el modelo se presentan en el siguiente capítulo.

En este capítulo se realizó la caracterización la red de distribución actual y se definió todos los componentes del modelo de programación lineal entera mixta. Así mismo se realizó la programación del modelo en GAMS, para luego analizar los resultados con el fin de determinar la nueva red de distribución de la empresa.

4. CAPITULO IV. ANALISIS DE RESULTADOS Y DOCUMENTACIÓN DE LA PROPUESTA

En este capítulo se presentará un resumen de los resultados que proporcionó el modelo de programación lineal entera mixta y se realizará el análisis de los mismos para luego documentar la propuesta final de la nueva red de distribución de la empresa Químicos Colombia S.A:

4.1. Resultados de GAMS

Luego de correr el modelo en el software GAMS se obtuvieron los siguientes resultados. El código y salidas del programa se pueden encontrar en la sección de anexos:

Para empezar el modelo decidió realizar la apertura de todas las bodegas:

Bodega	Z
Cartagena	1
Barranquilla	1
Medellin	1
Bogotá	1
Cali	1

Tabla 24 Bodegas a abrir de acuerdo a la variable binaria Z del modelo

Fuente: Elaboración propia.2017

Lo cual tiene sentido porque el costo de almacenamiento es bastante inferior respecto al transporte, entonces es normal que el modelo busque llevar el producto a la bodega más cercana de cada cliente porque ahí es donde se tiene el menor costo operacional. Para entender un poco mejor este punto se puede notar que el costo del transporte de la ruta más económica es casi 3 veces el costo de almacenamiento en una bodega.

A continuación se puede ver la tabla 25 que muestra la bodega desde donde se debe satisfacer la demanda de cada producto para cada cliente. En esta se ve como el modelo busca atender la demanda desde la ubicación más cercana, e inclusive, así el cliente consume más de 1 producto todo será atendido desde la misma fuente. Al final de la tabla se puede encontrar el porcentaje del volumen que cada bodega debe manejar de acuerdo al total, teniendo a Medellín con un 46%, Bogotá con un 40%, Cali con un 12%, Cartagena con un 1% y Barranquilla con un 0.2%.

Cliente/Producto	Demanda	Cartagena	Barranquilla	Medellin	Bogotá	Cali
Cliente1						
CC	1,036,050			1,036,050		
Cliente2						
HIPC	796,860				796,860	
Cliente3						
CC	405,000			405,000		
AC	240,253			240,253		
Cliente4						
AC	483,951				483,951	
Cliente5						
PS	467,081					467,081
Cliente6						
AC	406,445			406,445		
CC	20,000			20,000		
Cliente7						
AC	329,647				329,655	
CC	18,800				18,800	
Cliente8						
PS	118,585				118,585	
Cliente9						
PS	68,645					68,645
Cliente10						
PS	68,585	68,585				
Cliente11						
AC	32,000			32,000		
CC	4,000			4,000		
Cliente12						
AC	35,808				35,808	

Ciente13						
PS	30,597				30,697	
Ciente14						
AC	23,714				23,714	
CC	4,000				4,000	
Ciente15						
PS	24,940				24,940	
Ciente16						
HIPC	19,680			19,680		
Ciente17						
HIPC	14,620					14,620
Ciente18						
AC	10,000		10,000			
Total en KG	4,659,261	68,585	10,000	2,163,428	1,867,010	550,346
Total en %	100%	1%	0.2%	46%	40%	12%

Tabla 25 Bodega desde la que se debe atender la demanda de cada cliente por producto en Kg

Fuente: Elaboración propia.2017

Para reforzar lo dicho en el párrafo anterior en la siguiente tabla se ve la distribución de cada producto en cada bodega. Claramente se puede identificar que no hay una bodega que se dedique a trabajar con un producto específico sino que los productos que manejan corresponden a la demanda de los clientes cercanos:

Bodega/Producto	CC	AC	HIPC	PS
Cartagena	-	-	-	68,585
Barranquilla	-	10,000	-	-
Medellin	1,465,050	678,698	19,680	-
Bogotá	22,800	873,128	796,860	174,222
Cali	-	-	14,620	535,726
Total	1,487,850	1,561,826	831,160	778,533

Tabla 26 Distribución por producto en cada bodega en Kg

Fuente: Elaboración propia.2017

La solución presentada por GAMS cumple satisfactoriamente con todas las restricciones establecidas para el modelo de programación lineal entera mixta sin utilizar la máxima capacidad productiva de ningún producto, la capacidad de almacenamiento de ninguna bodega, garantizando el balance del flujo de producto

de cada producto en cada bodega y atendiendo el 100% de la demanda de cada cliente (Para ver los resultados detallados del modelo referirse al anexo 1).

4.2. Análisis e interpretación de los resultados

El modelo de programación en GAMS sugiere que se realice la apertura de una bodega en cada una de las ciudades disponibles para atender la demanda aledaña, sin embargo se procede a realizar un análisis de cada bodega para validar que la implementación sea práctica y viable dentro de la compañía.

En primer lugar se encuentra sin ninguna sorpresa a Medellín y Bogotá con el 86% de la carga, lo cual era un resultado esperado de forma intuitiva a partir de la Imagen 6 - Mapa de calor de la demanda en Colombia. La mayor cantidad de producto debe ser configurada para que pase por estas dos bodegas. Si bien esto coincide con los dos almacenes que se tienen al interior del país la cantidad de carga y los clientes a atender desde Bogotá es mayor en la solución de modelo y se encuentra alineado con los hallazgos de las oportunidades de mejora en la caracterización del proceso.

Para el caso de Barranquilla, aunque matemáticamente hablando, las cuentas dan positivas se debe tener en cuenta que sólo se atendería el 0.2% del total de la demanda que corresponde a un cliente pequeño y que no corresponde a productos de mayor margen. También hay que aclarar que tener una bodega adicional abierta genera una carga administrativa que no está contemplada en el modelo como lo es el tiempo de la persona que debe hacerle seguimiento a las órdenes de ingreso y salida, el tiempo del área de contraloría para realizar las conciliaciones mensuales y el inventario anual, el tiempo de las personas del departamento de tecnología para configurar en el ERP la nueva bodega.

En términos prácticos esta demanda podría manejarse sin mayor complicación desde la bodega de Cartagena con las personas que ya están asignadas para esta ubicación. Ahora, la bodega de Cartagena en el modelo se muestra que sólo maneja

el 1% de la carga y se podría caer en la tentación de pensar que no es suficiente para justificar su apertura, pero esta ubicación tiene un componente adicional que está por fuera del alcance de este proyecto que es eliminar los costos de demoras por devolución de contenedores haciendo la función de la plataforma de cross-docking.

Actualmente la empresa Químicos Colombia S.A., por políticas internas, tiene toda orden de importación configurada en el ERP con una ubicación destino (que ya existe en el ERP) y debe llegar allá físicamente, es decir, si se importa un contenedor configurado para llegar a Medellín el contenedor debe ir hasta esa ciudad aún si la entrega se va a realizar en la costa. Con la apertura en Cartagena se tendría la opción de separar el producto para distribuirlo de acuerdo a la propuesta del modelo y, adicionalmente, también incrementaría la capacidad de consolidación de carga para eliminar los fletes muertos.

Finalmente, para el caso de Cali, se tiene un volumen interesante, de un producto de alto margen y la bodega no sería dedicada para un solo cliente. En esta parte del país, específicamente en el Cauca, existe una particularidad y es la alta frecuencia de los paros y bloqueos de vías, por tanto el tener una bodega cercana al cliente ayuda a facilitar el manejo de los eventos que se puedan presentar durante todo el año. Otro punto que tiene esta ubicación es el potencial de crecimiento porque Cali cuenta con una industria manufacturera representativa, y como los productos de la empresa Químicos SA son para consumo industrial, le agrega un atractivo adicional con miras al crecimiento del negocio en el largo plazo.

En conclusión, después de realizar el análisis de la solución propuesta por el modelo de programación lineal entera mixta teniendo en cuenta los requerimientos, expectativas y necesidades de la empresa Químicos SA, el proyecto propone realizar sólo la apertura de las bodegas de: Cartagena, Bogotá, Medellín y Cali, y atender la demanda del atlántico desde la bodega de Cartagena.

La solución encontrada por el modelo de programación lineal entera mixta tiene como resultado un costo total de \$2,242,453,880.85, valor inferior al costo total de

la red de distribución actual que corresponde a \$2,525,314,512.11; es decir, que con la nueva red de distribución se logra una reducción de \$ 282,860,631.26 en los costos operativos totales, correspondiente a una reducción del 11.2%.

Esta solución además de ser más económica para la empresa le permite mejorar los tiempos de respuesta a los clientes puesto que en este escenario los productos están almacenados más cerca de la ubicación de los clientes. Con este mejor tiempo de respuesta se puede mejorar el servicio para generar fidelización o inclusive para negociar las condiciones del contrato, porque ahora la respuesta ante emergencias va a ser más ágil y la probabilidad de eventos no deseados se disminuye dado que el tiempo de exposición es menor. Adicionalmente, también representa una oportunidad para aumentar la participación del mercado en Cali y Cartagena. Los detalles de lo sugerido por el proyecto se encuentran a continuación.

4.3. Propuesta de la nueva red de distribución

De acuerdo a los resultados del modelo de programación lineal entera mixta y el análisis realizado con la empresa Químicos SA se deriva la propuesta de tener 4 locaciones de almacenamiento en Colombia ubicadas en las ciudades de Cartagena, Medellín, Bogotá y Cali. Desde donde cada bodega atenderá en su totalidad los siguientes clientes con la respectiva cantidad de volumen por tipo de producto:

Cartagena: Cliente10 y Cliente18

Producto/Bodega	Cartagena
CC	
AC	-
HIPC	-
PS	68,585
Total	68,585

Tabla 27 Cantidad de Kg de cada producto a movilizar por la bodega de Cartagena Fuente:

Elaboración propia.2017

Medellín: Cliente1, Cliente3, Cliente6, Cliente11 y Cliente16

Producto/Bodega	Medellin
CC	1,465,050
AC	678,698
HIPC	19,680
PS	-
Total	2,163,428

Tabla 28 Cantidad de Kg de cada producto a movilizar por la bodega de Medellín

Elaboración propia.2017

Bogotá: Cliente2, Cliente4, Cliente7, Cliente8, Cliente12, Cliente13, Cliente14 y Cliente15

Producto/Bodega	Bogotá
CC	22,800
AC	873,128
HIPC	796,860
PS	174,222
Total	1,867,010

Tabla 29 Cantidad de Kg de cada producto a movilizar por la bodega de Bogotá Fuente:

Elaboración propia.2017

Cali: Cliente5 , Cliente9 y Cliente17

Producto/Bodega	Cali
CC	-
AC	-
HIPC	14,620
PS	535,726
Total	550,346

Tabla 30 Cantidad de Kg de cada producto a movilizar por la bodega de Cali

Fuente: Elaboración Propia.2017

En la siguiente imagen se representa la nueva red de distribución propuesta para la empresa Químicos Colombia S.A:

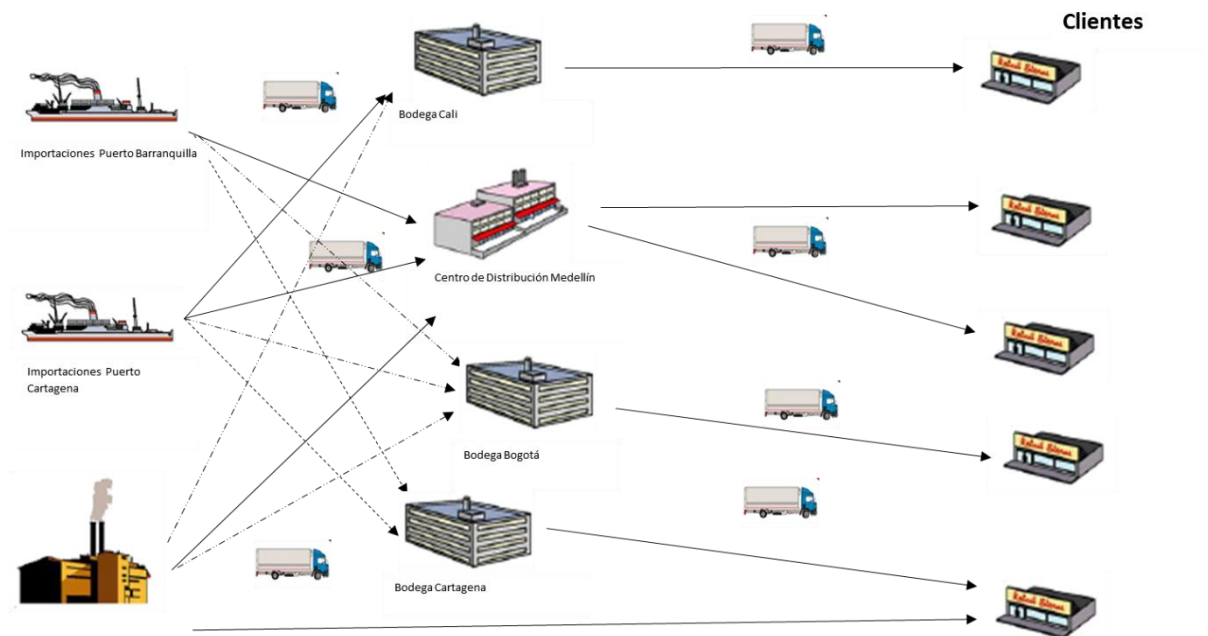


Imagen 7 Nueva Red de distribución propuesta para la empresa Químicos Colombia S.A
Fuente: Elaboración propia.2017

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este último capítulo se resumen las conclusiones y recomendaciones basadas en los resultados y hallazgos relevantes obtenidos durante el desarrollo del proyecto de investigación y su repercusión sobre la red de distribución de Químicos Colombia S.A.

5.1. Conclusiones

- Al diagnosticar la red de distribución actual de la empresa Químicos SA se identificaron flujos no óptimos e ineficiencias logísticas que evidenciaron que la red utilizada no es la más adecuada para las necesidades actuales de la compañía.
- Teniendo en cuenta los resultados del modelo matemático, las necesidades, los requerimientos internos y la estrategia de la compañía; en la propuesta final se definieron como ubicaciones de la nueva red de distribución: Cartagena, Bogota, Cali y Medellín
- No obstante, los resultados del modelo de programación indicaron que se debía abrir la bodega de Barranquilla para atender los clientes ubicados en el Atlántico, el realizar su apertura conlleva un cargo administrativo no representado en el modelo, por tanto esta ubicación no fue incluida en la propuesta final. La demanda de los clientes de esta ciudad será abastecida desde la bodega Cartagena
- Con la nueva red de distribución se mejorará el desempeño financiero de la empresa Químicos Colombia S.A, debido a que se obtiene una reducción de 11.2% en los costos totales de la operación de distribución.

- En una red de distribución el costo de transporte es el componente más relevante en la ecuación de costos totales operacionales, debido a que estos son mayores al costo de almacenamiento. Esto, en Colombia, es más significativo debido a la geografía del país, la falta de modos de transporte alternativos como el férreo y el fluvial; y además de la infraestructura vial poco desarrollada con que cuenta el país.
- Los modelos de programación lineal entera mixta son una buena herramienta para buscar soluciones óptimas para los problemas de redes de distribución logística, específicamente los relacionados con ubicación de múltiples instalaciones.
- A pesar de que los modelos de programación lineal entera mixta son una buena herramienta para encontrar soluciones óptimas, es crítico realizar un análisis de los resultados para tener en cuenta factores que son difíciles de modelar y pueden definir ayudar a establecer una opción más realista. Es decir no necesariamente la solución óptima puede ser la más adecuada.

5.2. Recomendaciones.

- Debido a que el modelo fue diseñado para un nivel de toma de decisiones estratégico, el paso siguiente es traducir las soluciones obtenidas para los niveles táctico y posteriormente operativo, cuyo alcance podría ser: el desarrollo de rutas, definición de formas de cargue y alistamiento de carga y la selección del tipo de vehículo.
- Es importante involucrar a todo el personal en los cambios propuestos de modo que toda la organización se muestre comprometida con el cambio y las mejoras presentadas para lograr un éxito en la implementación de la propuesta.

- Una vez implementada la propuesta es importante la comunicación a los clientes para ellos puedan valorar la gestión de la empresa de ubicar los productos a una distancia más próxima a sus instalaciones. Esto se podría utilizar como factor diferenciador para fidelizar a los clientes.

BIBLIOGRAFÍA

Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP) (Agosto, 2013). Supply Chain Management. Terms and Glossary. Recuperado de: http://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms/

CHOPRA, Sunil & MEINDL, Peter.(2008) Administración de la cadena de suministro. Madrid: Pearson Education.

Davila, J., Ramirez, L. (2012). Modelo matemático para la optimización de una cadena de suministro global con consideraciones de cupos de compra y periodos de pago. El Hombre y la Máquina. N° 38.

General Algebraic Modeling System (s.f.). En *Wikipedia*. Recuperado el 16 de diciembre de 2013 de: https://es.wikipedia.org/wiki/General_Algebraic_Modeling_System

Glosario de Términos logísticos. Recuperado de: <http://www.upct.es>

Grupo Herdez. (2014). Red de Distribución: Caso de Éxito. Recuperado de: http://www.sintec.com/wp-content/uploads/2014/04/Red-de-Distribucion-Grupo-Herdez_Caso-de-exito-Sintec.pdf

Guillermo J. Lozano (2009) (pp. 71). Optimización. Universidad Nacional de Colombia

Investigación de Operaciones. Programación Lineal. Recuperado de: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial>

Quimicos S.A. Intranet (1995-2017). Acerca de Quimicos S.A. Recuperado de: <http://co.quimicoss.a.com/es-co/about-quimicosa>

Ramos, A., Sanchez, P. (Septiembre, 2010). Modelos matemáticos de optimización. Recuperado de: https://www.gams.com/fileadmin/community/contrib/doc/modelado_en_gams.pdf

Retos en Supply Chain. (Noviembre, 2014). El diseño de una red de distribución. Recuperado de : <http://retos-operaciones-logistica.eae.es/>

Ronald H. Ballou (2004) (pp. 554-666). Logística: administración de la cadena de suministro. Pearson Education

Vitasek, K. (Octubre 2006). Supply chain and logistics. Terms and glossary Revista *Virtual Pro*. Recuperado de: <https://www.revistavirtualpro.com/>

Yolanda Cuesta (Mayo, 2015). Solver en Excel. Recuperado de: <https://www.aboutespanol.com/solver-en-excel-1791023>

ANEXOS

Anexo 1. Planteamiento modelo PLM en GAMS

C:\Users\cacuna\Documents\gamsdir\projdir\QuimicosSA.lst jueves, 16 de noviembre de 2017 05:29:43 Page 1

```
1 GAMS 24.6.1 r55820 Released Jan 18, 2016 WIN-VS8 x86 32bit/MS Windows 11/16/17»
  17:24:16 Page 1
2 General Algebraic Modeling System
3 Compilation
4
5
6 1 Sets
7 2
8 3 i conjunto de plantas / Cartagena /
9 4 j conjunto de bodegas / Cartagena, Barranquilla, Medellin, Bogota
10 , Cali /
11 5 k conjunto de clientes / cliente1, cliente2, cliente3, cliente4,
12 cliente5, cliente6, cliente7, cliente8, cliente9, cliente10, cliente11, cl
13 iente12, cliente13, cliente14, cliente15, cliente16, cliente17, cliente18
14 /
15 6 L conjunto de productos / AC, CC, HIPC, PS / ;
16 7
17 8 Parameters
18 9
19 10 W(j) capacidad de la bodega j
20 11 / Cartagena 2400000
21 12 Barranquilla 2400000
22 13 Medellin 6000000
23 14 Bogota 4800000
24 15 Cali 3600000 /
25 16
26 17 F(j) costo de abrir la bodega j
27 18 / Cartagena 0
28 19 Barranquilla 30000000
29 20 Medellin 0
30 21 Bogota 0
31 22 Cali 30000000/
32 23
33 24 CP(1) capacidad de producción del producto 1
34 25 / AC 2300000
35 26 CC 2000000
36 27 HIPC 1500000
37 28 PS 1300000 /
38 29
39 30 R(1) Duración de meses del producto 1 en la bodega j
40 31 / AC 2
41 32 CC 4
42 33 HIPC 2
43 34 PS 3 /
44 35 CW(j) Costo de almacenar el producto 1 en la bodega j
45 36 / Cartagena 23.89
46 37 Barranquilla 23.89
47 38 Medellin 23.89
48 39 Bogota 23.89
49 40 Cali 23.89 /
50 41
51 42 P(1) Precio del producto 1
52 43 / AC 3278
53 44 CC 4836
54 45 HIPC 2597
55 46 PS 5474 /
56 47
```

```

57 48 ;
58 49
59 50      Table T(i,j,l) costo de transporte unitario del producto l desde
60      la planta i hacia la bodega j
61 51      Cartagena.(AC,CC,HIPC,PS)      Barranquilla.(AC,CC,HIPC,PS)
62      Medellin.(AC,CC,HIPC,PS)      Bogota.(AC,CC,HIPC,PS)      Cali.(AC,CC
63      ,HIPC,PS)
64 52 Cartagena      37.1      117.65
65      173.75      333.33      375
66      ;
67 53
68 54
69 55
70 56      Table d(k,j,l) Costo de transporte unitario del producto l de la
71      bodega j hacia el cliente k
72 57      Cartagena.(AC,CC,HIPC,PS)      Barranquilla.(AC,CC,HIPC
73      ,PS)      Medellin.(AC,CC,HIPC,PS)      Bogota.(AC,CC,HIPC,PS)      Cali.(A
74      C,CC,HIPC,PS)
75 58 cliente1      392.86      520.83
76      78.57      372.08      321
77      .43
78 59 cliente2      589.29      625
79      318.93      95.83      35
80      0.82
81 60 cliente3      392.86      520.83
82      78.57      372.08      321
83      .43
84 61 cliente4      589.29      625
85      318.93      95.83      350
86      .82
87 62 cliente5      799.94      927.92
88      348.93      779.17      85.
89      65
90 63 cliente6      392.86      520.83
91      78.57      372.08      321
92      .43
93 64 cliente7      589.29      625
94      318.93      95.83      350
95      .82
96 65 cliente8      589.29      625
97      319.93      95.83      350
98      .82
99 66 cliente9      571.43      729.17
100      321.43      412.5      78.
101      57
102 67 cliente10      71.43      270.83
103      425.00      687.50      571
104      .43
105 68 cliente11      446.43      520.83
106      78.57      373.08      321
107      .43
108 69 cliente12      589.29      625
109      318.93      95.83      350
110      .82
111 70 cliente13      589.29      625
112      318.93      95.83      350
113      .82

```

```

114 71 cliente14      589.29      625
115      318.93      95.83      350
116      .82
117 72 cliente15      589.29      625
118      318.93      95.83      350
119      .82
120 73 cliente16      392.86      520.83
121      78.57      372.08      321
122      .43
123 74 cliente17      571.43      729.17
124      321.43      412.5      78.
125      57
126 75 cliente18      232.14      71.43
127      468.57      625.00      687
128      .50
129 76
130 77
131
132      ;
133 78
134 79      Table LT1(i,j) Lead time entre la planta i y la bodega j en días
135 80      Cartagena      Barranquilla      Medellin      Bogota C
136      ali
137 81 Cartagena      1      1      2      3      4
138      ;
139 82
140 83      Table LT3 (k,j) Lead time entre la bodega j y el cliente k
141 84      Cartagena      Barranquilla      Medellin      Bogota Cali
142 85 cliente1      2      2      1      2      2
143 86 cliente2      3      3      2      1      2
144 87 cliente3      2      2      1      2      2
145 88 cliente4      3      3      2      1      2
146 89 cliente5      5      5      3      3      1
147 90 cliente6      2      2      1      2      2
148 91 cliente7      4      4      2      2      1
149 92 cliente8      3      3      2      1      2
150 93 cliente9      4      4      2      2      1
151 94 cliente10     1      1      2      3      4
152 95 cliente11     2      2      2      2      3
153 96 cliente12     3      3      2      1      2
154 97 cliente13     3      3      2      1      2
155 98 cliente14     3      3      2      1      2
156 99 cliente15     3      3      2      1      2
157 100 cliente16     2      2      1      2      2
158 101 cliente17     4      4      2      2      1
159 102 cliente18     1      1      2      3      4
160 103      ;
161 104
162 105      ;
163 106
164 107      Table a(k,l) Demanda del cliente k del producto l
165 108      AC      CC      HIPC      PS
166 109 cliente1      1036050
167 110 cliente2      796860
168 111 cliente3      240253      405000
169 112 cliente4      483951
170 113 cliente5      467081

```

```

171 114 cliente6      406445    20000
172 115 cliente7      329647    18800
173 116 cliente8                118585
174 117 cliente9                68645
175 118 cliente10               68585
176 119 cliente11      32000     4000
177 120 cliente12      35808
178 121 cliente13                30597
179 122 cliente14      23714     4000
180 123 cliente15                24940
181 124 cliente16                19680
182 125 cliente17                14620
183 126 cliente18      10000
184 127
185 128 ;
186 129
187 130
188 131 Variables
189 132 X(i,j,l) cantidad de producto l transportado de la planta i a la bodega j
190 133 Y(j,k,l) Cantidad de producto l transportado de la bodega j al cliente k
191 134 Z(j) Variable binaria que indica la apertura de una bodega j
192 135 CT Costo total ;
193 136 positive variables X,Y;
194 137 binary variable Z;
195 138
196 139
197 140 Equations
198 141
199 142
200 143
201 144 FuncionObjetivo define la función objetivo
202 145 Demanda(k,l) Satisface la demanda del cliente k del produ
203 146 cto l
204 147 Balance(j,l) Garantiza el balance del flujo entre la planta i
205 148 bodega j cliente k y producto l
206 149 Capacidad(l) Garantiza la capacidad productiva del produc
207 150 to l
208 151 Almacenamiento(j) Garantiza la capacidad de almacenamiento de
209 152 la bodega j ;
210 153
211 154
212 155
213 156
214 157
215 158 FuncionObjetivo.. {sum(j,F(j)*Z(j))} + {sum((i,j,l),T(i,j,l)*X(i,j,l))} +
216 159 sum((k,j,l),d(k,j,L)*Y(j,k,l)) + sum((i,j,l),CW(j)*X(i,j,l)*R(l) + X(i,j,
217 160 l)*LT1(i,j)*P(l)/365) + sum((j,k,l),Y(j,k,l)*LT3(k,j)*P(l)/365) =e= CT ;
218 161
219 162 Almacenamiento(j).. sum((i,l), X(i,j,l)) =l= W(j)*Z(j);
220 163
221 164 Demanda(k,l).. sum(j, Y(j,k,l)) =e= a(k,l);
222 165
223 166 Balance(j,l).. sum(k,Y(j,k,l)) =e= sum(i, X(i,j,l)) ;
224 167
225 168 Capacidad(l).. sum((i,j), X(i,j,l)) =l= CP(l) ;
226 169
227 170

```

```

228 165
229 166 model QuimicosSA /All/ ;
230 167 solve QuimicosSA using MIP minimizing CT;
231 168
232 169
233 170
234 171
235 172
236
237
238 COMPILATION TIME      = 0.000E+0000 SECONDS      3 MB 24.6.1 r55820 WIN-VS8
239 GAMS 24.6.1 r55820 Released Jan 18, 2016 WIN-VS8 x86 32bit/MS Windows 11/16/17»
      17:24:16 Page 2
240 General Algebraic Modeling System
241 Equation Listing      SOLVE QuimicosSA Using MIP From line 167
242
243
244 ---- FuncionObjetivo =E= define la función objetivo
245
246 FuncionObjetivo.. 93.8608219178082*X(Cartagena,Cartagena,AC)
247
248      + 145.909315068493*X(Cartagena,Cartagena,CC)
249
250      + 91.9950684931507*X(Cartagena,Cartagena,HIPC)
251
252      + 123.767260273973*X(Cartagena,Cartagena,PS)
253
254      + 174.410821917808*X(Cartagena,Barranquilla,AC)
255
256      + 226.459315068493*X(Cartagena,Barranquilla,CC)
257
258      + 172.545068493151*X(Cartagena,Barranquilla,HIPC)
259
260      + 204.317260273973*X(Cartagena,Barranquilla,PS)
261
262      + 239.491643835616*X(Cartagena,Medellin,AC)
263
264      + 295.808630136986*X(Cartagena,Medellin,CC)
265
266      + 235.760136986301*X(Cartagena,Medellin,HIPC)
267
268      + 275.414520547945*X(Cartagena,Medellin,PS)
269
270      + 408.052465753425*X(Cartagena,Bogota,AC)
271
272      + 468.637945205479*X(Cartagena,Bogota,CC)
273
274      + 402.455205479452*X(Cartagena,Bogota,HIPC)
275
276      + 449.991780821918*X(Cartagena,Bogota,PS)
277
278      + 458.703287671233*X(Cartagena,Cali,AC)
279
280      + 523.557260273973*X(Cartagena,Cali,CC)
281
282      + 451.240273972603*X(Cartagena,Cali,HIPC)
283

```


Anexo 2.Resultados modelo MIP en GAMS

C:\Users\cacuna\Documents\gamsdir\projdin\QuimicosSA.lst jueves, 16 de noviembre de 2017 05:29:43 Page 6

```
284      + 506.65904109589*X(Cartagena,Cali,PS)
285
286      + 410.821643835616*Y(Cartagena,cliente1,AC)
287
288      + 419.358630136986*Y(Cartagena,cliente1,CC)
289
290      + 407.090136986301*Y(Cartagena,cliente1,HIPC)
291
292      + 422.854520547945*Y(Cartagena,cliente1,PS)
293
294      + 616.232465753425*Y(Cartagena,cliente2,AC)
295
296      + 629.037945205479*Y(Cartagena,cliente2,CC)
297
298      + 610.635205479452*Y(Cartagena,cliente2,HIPC)
299
300      + 634.281780821918*Y(Cartagena,cliente2,PS)
301
302      + 410.821643835616*Y(Cartagena,cliente3,AC)
303
304      + 419.358630136986*Y(Cartagena,cliente3,CC)
305
306      + 407.090136986301*Y(Cartagena,cliente3,HIPC)
307
308      + 422.854520547945*Y(Cartagena,cliente3,PS)
309
310      + 616.232465753425*Y(Cartagena,cliente4,AC)
311
312      + 629.037945205479*Y(Cartagena,cliente4,CC)
313
314      + 610.635205479452*Y(Cartagena,cliente4,HIPC)
315
316      + 634.281780821918*Y(Cartagena,cliente4,PS)
317
318      + 844.844109589041*Y(Cartagena,cliente5,AC)
319
320      + 866.186575342466*Y(Cartagena,cliente5,CC)
321
322      + 835.515342465754*Y(Cartagena,cliente5,HIPC)
323
324      + 874.926301369863*Y(Cartagena,cliente5,PS)
325
326      + 410.821643835616*Y(Cartagena,cliente6,AC)
327
328      + 419.358630136986*Y(Cartagena,cliente6,CC)
329
330      + 407.090136986301*Y(Cartagena,cliente6,HIPC)
331
332      + 422.854520547945*Y(Cartagena,cliente6,PS)
333
334      + 625.213287671233*Y(Cartagena,cliente7,AC)
335
336      + 642.287260273973*Y(Cartagena,cliente7,CC)
337
338      + 617.750273972603*Y(Cartagena,cliente7,HIPC)
339
340      + 649.27904109589*Y(Cartagena,cliente7,PS)
```

```

341
342      + 616.232465753425*Y(Cartagena,cliente8,AC)
343
344      + 629.037945205479*Y(Cartagena,cliente8,CC)
345
346      + 610.635205479452*Y(Cartagena,cliente8,HIPC)
347
348      + 634.281780821918*Y(Cartagena,cliente8,PS)
349
350      + 607.353287671233*Y(Cartagena,cliente9,AC)
351
352      + 624.427260273973*Y(Cartagena,cliente9,CC)
353
354      + 599.890273972603*Y(Cartagena,cliente9,HIPC)
355
356      + 631.41904109589*Y(Cartagena,cliente9,PS)
357
358      + 80.4108219178082*Y(Cartagena,cliente10,AC)
359
360      + 84.6793150684932*Y(Cartagena,cliente10,CC)
361
362      + 78.5450684931507*Y(Cartagena,cliente10,HIPC)
363
364      + 86.4272602739726*Y(Cartagena,cliente10,PS)
365
366      + 464.391643835616*Y(Cartagena,cliente11,AC)
367
368      + 472.928630136986*Y(Cartagena,cliente11,CC)
369
370      + 460.660136986301*Y(Cartagena,cliente11,HIPC)
371
372      + 476.424520547945*Y(Cartagena,cliente11,PS)
373
374      + 616.232465753425*Y(Cartagena,cliente12,AC)
375
376      + 629.037945205479*Y(Cartagena,cliente12,CC)
377
378      + 610.635205479452*Y(Cartagena,cliente12,HIPC)
379
380      + 634.281780821918*Y(Cartagena,cliente12,PS)
381
382      + 616.232465753425*Y(Cartagena,cliente13,AC)
383
384      + 629.037945205479*Y(Cartagena,cliente13,CC)
385
386      + 610.635205479452*Y(Cartagena,cliente13,HIPC)
387
388      + 634.281780821918*Y(Cartagena,cliente13,PS)
389
390      + 616.232465753425*Y(Cartagena,cliente14,AC)
391
392      + 629.037945205479*Y(Cartagena,cliente14,CC)
393
394      + 610.635205479452*Y(Cartagena,cliente14,HIPC)
395
396      + 634.281780821918*Y(Cartagena,cliente14,PS)
397

```

```

398      + 616.232465753425*Y(Cartagena,cliente15,AC)
399
400      + 629.037945205479*Y(Cartagena,cliente15,CC)
401
402      + 610.635205479452*Y(Cartagena,cliente15,HIPC)
403
404      + 634.281780821918*Y(Cartagena,cliente15,PS)
405
406      + 410.821643835616*Y(Cartagena,cliente16,AC)
407
408      + 419.358630136986*Y(Cartagena,cliente16,CC)
409
410      + 407.090136986301*Y(Cartagena,cliente16,HIPC)
411
412      + 422.854520547945*Y(Cartagena,cliente16,PS)
413
414      + 607.353287671233*Y(Cartagena,cliente17,AC)
415
416      + 624.427260273973*Y(Cartagena,cliente17,CC)
417
418      + 599.890273972603*Y(Cartagena,cliente17,HIPC)
419
420      + 631.41904109589*Y(Cartagena,cliente17,PS)
421
422      + 241.120821917808*Y(Cartagena,cliente18,AC)
423
424      + 245.389315068493*Y(Cartagena,cliente18,CC)
425
426      + 239.255068493151*Y(Cartagena,cliente18,HIPC)
427
428      + 247.137260273973*Y(Cartagena,cliente18,PS)
429
430      + 538.791643835616*Y(Barranquilla,cliente1,AC)
431
432      + 547.328630136986*Y(Barranquilla,cliente1,CC)
433
434      + 535.060136986301*Y(Barranquilla,cliente1,HIPC)
435
436      + 550.824520547945*Y(Barranquilla,cliente1,PS)
437
438      + 651.942465753425*Y(Barranquilla,cliente2,AC)
439
440      + 664.747945205479*Y(Barranquilla,cliente2,CC)
441
442      + 646.345205479452*Y(Barranquilla,cliente2,HIPC)
443
444      + 669.991780821918*Y(Barranquilla,cliente2,PS)
445
446      + 538.791643835616*Y(Barranquilla,cliente3,AC)
447
448      + 547.328630136986*Y(Barranquilla,cliente3,CC)
449
450      + 535.060136986301*Y(Barranquilla,cliente3,HIPC)
451
452      + 550.824520547945*Y(Barranquilla,cliente3,PS)
453
454      + 651.942465753425*Y(Barranquilla,cliente4,AC)

```

```

455
456      + 664.747945205479*Y(Barranquilla,cliente4,CC)
457
458      + 646.345205479452*Y(Barranquilla,cliente4,HIPC)
459
460      + 669.991780821918*Y(Barranquilla,cliente4,PS)
461
462      + 972.824109589041*Y(Barranquilla,cliente5,AC)
463
464      + 994.166575342466*Y(Barranquilla,cliente5,CC)
465
466      + 963.495342465753*Y(Barranquilla,cliente5,HIPC)
467
468      + 1002.90630136986*Y(Barranquilla,cliente5,PS)
469
470      + 538.791643835616*Y(Barranquilla,cliente6,AC)
471
472      + 547.328630136986*Y(Barranquilla,cliente6,CC)
473
474      + 535.060136986301*Y(Barranquilla,cliente6,HIPC)
475
476      + 550.824520547945*Y(Barranquilla,cliente6,PS)
477
478      + 660.923287671233*Y(Barranquilla,cliente7,AC)
479
480      + 677.997260273973*Y(Barranquilla,cliente7,CC)
481
482      + 653.460273972603*Y(Barranquilla,cliente7,HIPC)
483
484      + 684.98904109589*Y(Barranquilla,cliente7,PS)
485
486      + 651.942465753425*Y(Barranquilla,cliente8,AC)
487
488      + 664.747945205479*Y(Barranquilla,cliente8,CC)
489
490      + 646.345205479452*Y(Barranquilla,cliente8,HIPC)
491
492      + 669.991780821918*Y(Barranquilla,cliente8,PS)
493
494      + 765.093287671233*Y(Barranquilla,cliente9,AC)
495
496      + 782.167260273973*Y(Barranquilla,cliente9,CC)
497
498      + 757.630273972603*Y(Barranquilla,cliente9,HIPC)
499
500      + 789.15904109589*Y(Barranquilla,cliente9,PS)
501
502      + 279.810821917808*Y(Barranquilla,cliente10,AC)
503
504      + 284.079315068493*Y(Barranquilla,cliente10,CC)
505
506      + 277.945068493151*Y(Barranquilla,cliente10,HIPC)
507
508      + 285.827260273973*Y(Barranquilla,cliente10,PS)
509
510      + 538.791643835616*Y(Barranquilla,cliente11,AC)
511

```

```

512      + 547.328630136986*Y(Barranquilla,cliente11,CC)
513
514      + 535.060136986301*Y(Barranquilla,cliente11,HIPC)
515
516      + 550.824520547945*Y(Barranquilla,cliente11,PS)
517
518      + 651.942465753425*Y(Barranquilla,cliente12,AC)
519
520      + 664.747945205479*Y(Barranquilla,cliente12,CC)
521
522      + 646.345205479452*Y(Barranquilla,cliente12,HIPC)
523
524      + 669.991780821918*Y(Barranquilla,cliente12,PS)
525
526      + 651.942465753425*Y(Barranquilla,cliente13,AC)
527
528      + 664.747945205479*Y(Barranquilla,cliente13,CC)
529
530      + 646.345205479452*Y(Barranquilla,cliente13,HIPC)
531
532      + 669.991780821918*Y(Barranquilla,cliente13,PS)
533
534      + 651.942465753425*Y(Barranquilla,cliente14,AC)
535
536      + 664.747945205479*Y(Barranquilla,cliente14,CC)
537
538      + 646.345205479452*Y(Barranquilla,cliente14,HIPC)
539
540      + 669.991780821918*Y(Barranquilla,cliente14,PS)
541
542      + 651.942465753425*Y(Barranquilla,cliente15,AC)
543
544      + 664.747945205479*Y(Barranquilla,cliente15,CC)
545
546      + 646.345205479452*Y(Barranquilla,cliente15,HIPC)
547
548      + 669.991780821918*Y(Barranquilla,cliente15,PS)
549
550      + 538.791643835616*Y(Barranquilla,cliente16,AC)
551
552      + 547.328630136986*Y(Barranquilla,cliente16,CC)
553
554      + 535.060136986301*Y(Barranquilla,cliente16,HIPC)
555
556      + 550.824520547945*Y(Barranquilla,cliente16,PS)
557
558      + 765.093287671233*Y(Barranquilla,cliente17,AC)
559
560      + 782.167260273973*Y(Barranquilla,cliente17,CC)
561
562      + 757.630273972603*Y(Barranquilla,cliente17,HIPC)
563
564      + 789.15904109589*Y(Barranquilla,cliente17,PS)
565
566      + 80.4108219178082*Y(Barranquilla,cliente18,AC)
567
568      + 84.6793150684932*Y(Barranquilla,cliente18,CC)

```

```

569
570      + 78.5450684931507*Y(Barranquilla,cliente18,HIPC)
571
572      + 86.4272602739726*Y(Barranquilla,cliente18,PS)
573
574      + 87.5508219178082*Y(Medellin,cliente1,AC)
575
576      + 91.8193150684931*Y(Medellin,cliente1,CC)
577
578      + 85.6850684931507*Y(Medellin,cliente1,HIPC)
579
580      + 93.5672602739726*Y(Medellin,cliente1,PS)
581
582      + 336.891643835616*Y(Medellin,cliente2,AC)
583
584      + 345.428630136986*Y(Medellin,cliente2,CC)
585
586      + 333.160136986301*Y(Medellin,cliente2,HIPC)
587
588      + 348.924520547945*Y(Medellin,cliente2,PS)
589
590      + 87.5508219178082*Y(Medellin,cliente3,AC)
591
592      + 91.8193150684931*Y(Medellin,cliente3,CC)
593
594      + 85.6850684931507*Y(Medellin,cliente3,HIPC)
595
596      + 93.5672602739726*Y(Medellin,cliente3,PS)
597
598      + 336.891643835616*Y(Medellin,cliente4,AC)
599
600      + 345.428630136986*Y(Medellin,cliente4,CC)
601
602      + 333.160136986301*Y(Medellin,cliente4,HIPC)
603
604      + 348.924520547945*Y(Medellin,cliente4,PS)
605
606      + 375.872465753425*Y(Medellin,cliente5,AC)
607
608      + 388.677945205479*Y(Medellin,cliente5,CC)
609
610      + 370.275205479452*Y(Medellin,cliente5,HIPC)
611
612      + 393.921780821918*Y(Medellin,cliente5,PS)
613
614      + 87.5508219178082*Y(Medellin,cliente6,AC)
615
616      + 91.8193150684931*Y(Medellin,cliente6,CC)
617
618      + 85.6850684931507*Y(Medellin,cliente6,HIPC)
619
620      + 93.5672602739726*Y(Medellin,cliente6,PS)
621
622      + 336.891643835616*Y(Medellin,cliente7,AC)
623
624      + 345.428630136986*Y(Medellin,cliente7,CC)
625

```

```

626      + 333.160136986301*Y(Medellin,cliente7,HIPC)
627
628      + 348.924520547945*Y(Medellin,cliente7,PS)
629
630      + 337.891643835616*Y(Medellin,cliente8,AC)
631
632      + 346.428630136986*Y(Medellin,cliente8,CC)
633
634      + 334.160136986301*Y(Medellin,cliente8,HIPC)
635
636      + 349.924520547945*Y(Medellin,cliente8,PS)
637
638      + 339.391643835616*Y(Medellin,cliente9,AC)
639
640      + 347.928630136986*Y(Medellin,cliente9,CC)
641
642      + 335.660136986301*Y(Medellin,cliente9,HIPC)
643
644      + 351.424520547945*Y(Medellin,cliente9,PS)
645
646      + 442.961643835616*Y(Medellin,cliente10,AC)
647
648      + 451.498630136986*Y(Medellin,cliente10,CC)
649
650      + 439.230136986301*Y(Medellin,cliente10,HIPC)
651
652      + 454.994520547945*Y(Medellin,cliente10,PS)
653
654      + 96.5316438356164*Y(Medellin,cliente11,AC)
655
656      + 105.068630136986*Y(Medellin,cliente11,CC)
657
658      + 92.8001369863014*Y(Medellin,cliente11,HIPC)
659
660      + 108.564520547945*Y(Medellin,cliente11,PS)
661
662      + 336.891643835616*Y(Medellin,cliente12,AC)
663
664      + 345.428630136986*Y(Medellin,cliente12,CC)
665
666      + 333.160136986301*Y(Medellin,cliente12,HIPC)
667
668      + 348.924520547945*Y(Medellin,cliente12,PS)
669
670      + 336.891643835616*Y(Medellin,cliente13,AC)
671
672      + 345.428630136986*Y(Medellin,cliente13,CC)
673
674      + 333.160136986301*Y(Medellin,cliente13,HIPC)
675
676      + 348.924520547945*Y(Medellin,cliente13,PS)
677
678      + 336.891643835616*Y(Medellin,cliente14,AC)
679
680      + 345.428630136986*Y(Medellin,cliente14,CC)
681
682      + 333.160136986301*Y(Medellin,cliente14,HIPC)

```

```

683
684      + 348.924520547945*Y(Medellin,cliente14,PS)
685
686      + 336.891643835616*Y(Medellin,cliente15,AC)
687
688      + 345.428630136986*Y(Medellin,cliente15,CC)
689
690      + 333.160136986301*Y(Medellin,cliente15,HIPC)
691
692      + 348.924520547945*Y(Medellin,cliente15,PS)
693
694      + 87.5508219178082*Y(Medellin,cliente16,AC)
695
696      + 91.8193150684931*Y(Medellin,cliente16,CC)
697
698      + 85.6850684931507*Y(Medellin,cliente16,HIPC)
699
700      + 93.5672602739726*Y(Medellin,cliente16,PS)
701
702      + 339.391643835616*Y(Medellin,cliente17,AC)
703
704      + 347.928630136986*Y(Medellin,cliente17,CC)
705
706      + 335.660136986301*Y(Medellin,cliente17,HIPC)
707
708      + 351.424520547945*Y(Medellin,cliente17,PS)
709
710      + 486.531643835616*Y(Medellin,cliente18,AC)
711
712      + 495.068630136986*Y(Medellin,cliente18,CC)
713
714      + 482.800136986301*Y(Medellin,cliente18,HIPC)
715
716      + 498.564520547945*Y(Medellin,cliente18,PS)
717
718      + 390.041643835616*Y(Bogota,cliente1,AC)
719
720      + 398.578630136986*Y(Bogota,cliente1,CC)
721
722      + 386.310136986301*Y(Bogota,cliente1,HIPC)
723
724      + 402.074520547945*Y(Bogota,cliente1,PS)
725
726      + 104.810821917808*Y(Bogota,cliente2,AC)
727
728      + 109.079315068493*Y(Bogota,cliente2,CC)
729
730      + 102.945068493151*Y(Bogota,cliente2,HIPC)
731
732      + 110.827260273973*Y(Bogota,cliente2,PS)
733
734      + 390.041643835616*Y(Bogota,cliente3,AC)
735
736      + 398.578630136986*Y(Bogota,cliente3,CC)
737
738      + 386.310136986301*Y(Bogota,cliente3,HIPC)
739

```



```

740      + 402.074520547945*Y(Bogota, cliente3, PS)
741
742      + 104.810821917808*Y(Bogota, cliente4, AC)
743
744      + 109.079315068493*Y(Bogota, cliente4, CC)
745
746      + 102.945068493151*Y(Bogota, cliente4, HIPC)
747
748      + 110.827260273973*Y(Bogota, cliente4, PS)
749
750      + 806.112465753425*Y(Bogota, cliente5, AC)
751
752      + 818.917945205479*Y(Bogota, cliente5, CC)
753
754      + 800.515205479452*Y(Bogota, cliente5, HIPC)
755
756      + 824.161780821918*Y(Bogota, cliente5, PS)
757
758      + 390.041643835616*Y(Bogota, cliente6, AC)
759
760      + 398.578630136986*Y(Bogota, cliente6, CC)
761
762      + 386.310136986301*Y(Bogota, cliente6, HIPC)
763
764      + 402.074520547945*Y(Bogota, cliente6, PS)
765
766      + 113.791643835616*Y(Bogota, cliente7, AC)
767
768      + 122.328630136986*Y(Bogota, cliente7, CC)
769
770      + 110.060136986301*Y(Bogota, cliente7, HIPC)
771
772      + 125.824520547945*Y(Bogota, cliente7, PS)
773
774      + 104.810821917808*Y(Bogota, cliente8, AC)
775
776      + 109.079315068493*Y(Bogota, cliente8, CC)
777
778      + 102.945068493151*Y(Bogota, cliente8, HIPC)
779
780      + 110.827260273973*Y(Bogota, cliente8, PS)
781
782      + 430.461643835616*Y(Bogota, cliente9, AC)
783
784      + 438.998630136986*Y(Bogota, cliente9, CC)
785
786      + 426.730136986301*Y(Bogota, cliente9, HIPC)
787
788      + 442.494520547945*Y(Bogota, cliente9, PS)
789
790      + 714.442465753425*Y(Bogota, cliente10, AC)
791
792      + 727.247945205479*Y(Bogota, cliente10, CC)
793
794      + 708.845205479452*Y(Bogota, cliente10, HIPC)
795
796      + 732.491780821918*Y(Bogota, cliente10, PS)

```

```

797
798      + 391.041643835616*Y(Bogota,cliente11,AC)
799
800      + 399.578630136986*Y(Bogota,cliente11,CC)
801
802      + 387.310136986301*Y(Bogota,cliente11,HIPC)
803
804      + 403.074520547945*Y(Bogota,cliente11,PS)
805
806      + 104.810821917808*Y(Bogota,cliente12,AC)
807
808      + 109.079315068493*Y(Bogota,cliente12,CC)
809
810      + 102.945068493151*Y(Bogota,cliente12,HIPC)
811
812      + 110.827260273973*Y(Bogota,cliente12,PS)
813
814      + 104.810821917808*Y(Bogota,cliente13,AC)
815
816      + 109.079315068493*Y(Bogota,cliente13,CC)
817
818      + 102.945068493151*Y(Bogota,cliente13,HIPC)
819
820      + 110.827260273973*Y(Bogota,cliente13,PS)
821
822      + 104.810821917808*Y(Bogota,cliente14,AC)
823
824      + 109.079315068493*Y(Bogota,cliente14,CC)
825
826      + 102.945068493151*Y(Bogota,cliente14,HIPC)
827
828      + 110.827260273973*Y(Bogota,cliente14,PS)
829
830      + 104.810821917808*Y(Bogota,cliente15,AC)
831
832      + 109.079315068493*Y(Bogota,cliente15,CC)
833
834      + 102.945068493151*Y(Bogota,cliente15,HIPC)
835
836      + 110.827260273973*Y(Bogota,cliente15,PS)
837
838      + 390.041643835616*Y(Bogota,cliente16,AC)
839
840      + 398.578630136986*Y(Bogota,cliente16,CC)
841
842      + 386.310136986301*Y(Bogota,cliente16,HIPC)
843
844      + 402.074520547945*Y(Bogota,cliente16,PS)
845
846      + 430.461643835616*Y(Bogota,cliente17,AC)
847
848      + 438.998630136986*Y(Bogota,cliente17,CC)
849
850      + 426.730136986301*Y(Bogota,cliente17,HIPC)
851
852      + 442.494520547945*Y(Bogota,cliente17,PS)
853

```

```

854      + 651.942465753425*Y(Bogota,cliente18,AC)
855
856      + 664.747945205479*Y(Bogota,cliente18,CC)
857
858      + 646.345205479452*Y(Bogota,cliente18,HIPC)
859
860      + 669.991780821918*Y(Bogota,cliente18,PS)
861
862      + 339.391643835616*Y(Cali,cliente1,AC)
863
864      + 347.928630136986*Y(Cali,cliente1,CC)
865
866      + 335.660136986301*Y(Cali,cliente1,HIPC)
867
868      + 351.424520547945*Y(Cali,cliente1,PS)
869
870      + 368.781643835616*Y(Cali,cliente2,AC)
871
872      + 377.318630136986*Y(Cali,cliente2,CC)
873
874      + 365.050136986301*Y(Cali,cliente2,HIPC)
875
876      + 380.814520547945*Y(Cali,cliente2,PS)
877
878      + 339.391643835616*Y(Cali,cliente3,AC)
879
880      + 347.928630136986*Y(Cali,cliente3,CC)
881
882      + 335.660136986301*Y(Cali,cliente3,HIPC)
883
884      + 351.424520547945*Y(Cali,cliente3,PS)
885
886      + 368.781643835616*Y(Cali,cliente4,AC)
887
888      + 377.318630136986*Y(Cali,cliente4,CC)
889
890      + 365.050136986301*Y(Cali,cliente4,HIPC)
891
892      + 380.814520547945*Y(Cali,cliente4,PS)
893
894      + 94.6308219178082*Y(Cali,cliente5,AC)
895
896      + 98.8993150684932*Y(Cali,cliente5,CC)
897
898      + 92.7650684931507*Y(Cali,cliente5,HIPC)
899
900      + 100.647260273973*Y(Cali,cliente5,PS)
901
902      + 339.391643835616*Y(Cali,cliente6,AC)
903
904      + 347.928630136986*Y(Cali,cliente6,CC)
905
906      + 335.660136986301*Y(Cali,cliente6,HIPC)
907
908      + 351.424520547945*Y(Cali,cliente6,PS)
909
910      + 359.800821917808*Y(Cali,cliente7,AC)

```

```

911
912      + 364.069315068493*Y(Cali,cliente7,CC)
913
914      + 357.935068493151*Y(Cali,cliente7,HIPC)
915
916      + 365.817260273973*Y(Cali,cliente7,PS)
917
918      + 368.781643835616*Y(Cali,cliente8,AC)
919
920      + 377.318630136986*Y(Cali,cliente8,CC)
921
922      + 365.050136986301*Y(Cali,cliente8,HIPC)
923
924      + 380.814520547945*Y(Cali,cliente8,PS)
925
926      + 87.5508219178082*Y(Cali,cliente9,AC)
927
928      + 91.8193150684931*Y(Cali,cliente9,CC)
929
930      + 85.6850684931507*Y(Cali,cliente9,HIPC)
931
932      + 93.5672602739726*Y(Cali,cliente9,PS)
933
934      + 607.353287671233*Y(Cali,cliente10,AC)
935
936      + 624.427260273973*Y(Cali,cliente10,CC)
937
938      + 599.890273972603*Y(Cali,cliente10,HIPC)
939
940      + 631.41904109589*Y(Cali,cliente10,PS)
941
942      + 348.372465753425*Y(Cali,cliente11,AC)
943
944      + 361.177945205479*Y(Cali,cliente11,CC)
945
946      + 342.775205479452*Y(Cali,cliente11,HIPC)
947
948      + 366.421780821918*Y(Cali,cliente11,PS)
949
950      + 368.781643835616*Y(Cali,cliente12,AC)
951
952      + 377.318630136986*Y(Cali,cliente12,CC)
953
954      + 365.050136986301*Y(Cali,cliente12,HIPC)
955
956      + 380.814520547945*Y(Cali,cliente12,PS)
957
958      + 368.781643835616*Y(Cali,cliente13,AC)
959
960      + 377.318630136986*Y(Cali,cliente13,CC)
961
962      + 365.050136986301*Y(Cali,cliente13,HIPC)
963
964      + 380.814520547945*Y(Cali,cliente13,PS)
965
966      + 368.781643835616*Y(Cali,cliente14,AC)
967

```

```

968      + 377.318630136986*Y(Cali,cliente14,CC)
969
970      + 365.050136986301*Y(Cali,cliente14,HIPC)
971
972      + 380.814520547945*Y(Cali,cliente14,PS)
973
974      + 368.781643835616*Y(Cali,cliente15,AC)
975
976      + 377.318630136986*Y(Cali,cliente15,CC)
977
978      + 365.050136986301*Y(Cali,cliente15,HIPC)
979
980      + 380.814520547945*Y(Cali,cliente15,PS)
981
982      + 339.391643835616*Y(Cali,cliente16,AC)
983
984      + 347.928630136986*Y(Cali,cliente16,CC)
985
986      + 335.660136986301*Y(Cali,cliente16,HIPC)
987
988      + 351.424520547945*Y(Cali,cliente16,PS)
989
990      + 87.5508219178082*Y(Cali,cliente17,AC)
991
992      + 91.8193150684931*Y(Cali,cliente17,CC)
993
994      + 85.6850684931507*Y(Cali,cliente17,HIPC)
995
996      + 93.5672602739726*Y(Cali,cliente17,PS)
997
998      + 723.423287671233*Y(Cali,cliente18,AC)
999
1000     + 740.497260273973*Y(Cali,cliente18,CC)
1001
1002     + 715.960273972603*Y(Cali,cliente18,HIPC)
1003
1004     + 747.48904109589*Y(Cali,cliente18,PS) + 30000000*Z(Barranquilla)
1005
1006     + 30000000*Z(Cali) - CT =E= 0 ; {LHS = 0}
1007
1008
1009 ---- Demanda =E= Satisface la demanda del cliente k del producto l
1010
1011 Demanda(clientel,AC).. Y(Cartagena,cliente1,AC) + Y(Barranquilla,cliente1,AC)
1012
1013     + Y(Medellin,cliente1,AC) + Y(Bogota,cliente1,AC) + Y(Cali,cliente1,AC)
1014     =E= 0 ; {LHS = 0}
1015
1016 Demanda(clientel,CC).. Y(Cartagena,cliente1,CC) + Y(Barranquilla,cliente1,CC)
1017
1018     + Y(Medellin,cliente1,CC) + Y(Bogota,cliente1,CC) + Y(Cali,cliente1,CC)
1019     =E= 1036050 ; {LHS = 0, INFES = 1036050 ****}
1020
1021 Demanda(clientel,HIPC).. Y(Cartagena,cliente1,HIPC)
1022
1023     + Y(Barranquilla,cliente1,HIPC) + Y(Medellin,cliente1,HIPC)
1024

```

```

1025      + Y(Bogota,cliente1,HIPC) + Y(Cali,cliente1,HIPC) =E= 0 ; {LHS = 0}
1026
1027 REMAINING 69 ENTRIES SKIPPED
1028
1029
1030 ---- Balance =E= Garantiza el balance del flujo entre la planta i bodega j cli
1031                  ente k y producto l
1032
1033 Balance(Cartagena,AC).. - X(Cartagena,Cartagena,AC) + Y(Cartagena,cliente1,AC)
1034
1035      + Y(Cartagena,cliente2,AC) + Y(Cartagena,cliente3,AC)
1036
1037      + Y(Cartagena,cliente4,AC) + Y(Cartagena,cliente5,AC)
1038
1039      + Y(Cartagena,cliente6,AC) + Y(Cartagena,cliente7,AC)
1040
1041      + Y(Cartagena,cliente8,AC) + Y(Cartagena,cliente9,AC)
1042
1043      + Y(Cartagena,cliente10,AC) + Y(Cartagena,cliente11,AC)
1044
1045      + Y(Cartagena,cliente12,AC) + Y(Cartagena,cliente13,AC)
1046
1047      + Y(Cartagena,cliente14,AC) + Y(Cartagena,cliente15,AC)
1048
1049      + Y(Cartagena,cliente16,AC) + Y(Cartagena,cliente17,AC)
1050
1051      + Y(Cartagena,cliente18,AC) =E= 0 ; {LHS = 0}
1052
1053 Balance(Cartagena,CC).. - X(Cartagena,Cartagena,CC) + Y(Cartagena,cliente1,CC)
1054
1055      + Y(Cartagena,cliente2,CC) + Y(Cartagena,cliente3,CC)
1056
1057      + Y(Cartagena,cliente4,CC) + Y(Cartagena,cliente5,CC)
1058
1059      + Y(Cartagena,cliente6,CC) + Y(Cartagena,cliente7,CC)
1060
1061      + Y(Cartagena,cliente8,CC) + Y(Cartagena,cliente9,CC)
1062
1063      + Y(Cartagena,cliente10,CC) + Y(Cartagena,cliente11,CC)
1064
1065      + Y(Cartagena,cliente12,CC) + Y(Cartagena,cliente13,CC)
1066
1067      + Y(Cartagena,cliente14,CC) + Y(Cartagena,cliente15,CC)
1068
1069      + Y(Cartagena,cliente16,CC) + Y(Cartagena,cliente17,CC)
1070
1071      + Y(Cartagena,cliente18,CC) =E= 0 ; {LHS = 0}
1072
1073 Balance(Cartagena,HIPC).. - X(Cartagena,Cartagena,HIPC)
1074
1075      + Y(Cartagena,cliente1,HIPC) + Y(Cartagena,cliente2,HIPC)
1076
1077      + Y(Cartagena,cliente3,HIPC) + Y(Cartagena,cliente4,HIPC)
1078
1079      + Y(Cartagena,cliente5,HIPC) + Y(Cartagena,cliente6,HIPC)
1080
1081      + Y(Cartagena,cliente7,HIPC) + Y(Cartagena,cliente8,HIPC)

```

```

1082
1083      + Y(Cartagena,cliente9,HIPC) + Y(Cartagena,cliente10,HIPC)
1084
1085      + Y(Cartagena,cliente11,HIPC) + Y(Cartagena,cliente12,HIPC)
1086
1087      + Y(Cartagena,cliente13,HIPC) + Y(Cartagena,cliente14,HIPC)
1088
1089      + Y(Cartagena,cliente15,HIPC) + Y(Cartagena,cliente16,HIPC)
1090
1091      + Y(Cartagena,cliente17,HIPC) + Y(Cartagena,cliente18,HIPC) =E= 0 ;
1092
1093      {LHS = 0}
1094
1095 REMAINING 17 ENTRIES SKIPPED
1096
1097
1098 ---- Capacidad =L= Garantiza la capacidad productiva del producto 1
1099
1100 Capacidad(AC).. X(Cartagena,Cartagena,AC) + X(Cartagena,Barranquilla,AC)
1101
1102      + X(Cartagena,Medellin,AC) + X(Cartagena,Bogota,AC) + X(Cartagena,Cali,AC)
1103      =L= 2300000 ; {LHS = 0}
1104
1105 Capacidad(CC).. X(Cartagena,Cartagena,CC) + X(Cartagena,Barranquilla,CC)
1106
1107      + X(Cartagena,Medellin,CC) + X(Cartagena,Bogota,CC) + X(Cartagena,Cali,CC)
1108      =L= 2000000 ; {LHS = 0}
1109
1110 Capacidad(HIPC).. X(Cartagena,Cartagena,HIPC) + X(Cartagena,Barranquilla,HIPC)
1111
1112      + X(Cartagena,Medellin,HIPC) + X(Cartagena,Bogota,HIPC)
1113
1114      + X(Cartagena,Cali,HIPC) =L= 1500000 ; {LHS = 0}
1115
1116 REMAINING ENTRY SKIPPED
1117
1118
1119 ---- Almacenamiento =L= Garantiza la capacidad de almacenamiento de la bodega
1120      j
1121
1122 Almacenamiento(Cartagena).. X(Cartagena,Cartagena,AC)
1123
1124      + X(Cartagena,Cartagena,CC) + X(Cartagena,Cartagena,HIPC)
1125
1126      + X(Cartagena,Cartagena,PS) - 2400000*Z(Cartagena) =L= 0 ; {LHS = 0}
1127
1128 Almacenamiento(Barranquilla).. X(Cartagena,Barranquilla,AC)
1129
1130      + X(Cartagena,Barranquilla,CC) + X(Cartagena,Barranquilla,HIPC)
1131
1132      + X(Cartagena,Barranquilla,PS) - 2400000*Z(Barranquilla) =L= 0 ; {LHS = 0}
1133
1134 Almacenamiento(Medellin).. X(Cartagena,Medellin,AC) + X(Cartagena,Medellin,CC)
1135
1136      + X(Cartagena,Medellin,HIPC) + X(Cartagena,Medellin,PS)
1137
1138      - 6000000*Z(Medellin) =L= 0 ; {LHS = 0}

```

```

1139
1140 REMAINING 2 ENTRIES SKIPPED
1141
1142 GAMS 24.6.1 r55820 Released Jan 18, 2016 WIN-VS8 x86 32bit/MS Windows 11/16/17»
      17:24:16 Page 3
1143 General Algebraic Modeling System
1144 Column Listing      SOLVE QuimicosSA Using MIP From line 167
1145
1146
1147 ---- X cantidad de producto l transportado de la planta i a la bodega j
1148
1149 X(Cartagena,Cartagena,AC)
1150      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1151      93.8608 FuncionObjetivo
1152      -1      Balance(Cartagena,AC)
1153      1      Capacidad(AC)
1154      1      Almacenamiento(Cartagena)
1155
1156 X(Cartagena,Cartagena,CC)
1157      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1158      145.9093 FuncionObjetivo
1159      -1      Balance(Cartagena,CC)
1160      1      Capacidad(CC)
1161      1      Almacenamiento(Cartagena)
1162
1163 X(Cartagena,Cartagena,HIPC)
1164      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1165      91.9951 FuncionObjetivo
1166      -1      Balance(Cartagena,HIPC)
1167      1      Capacidad(HIPC)
1168      1      Almacenamiento(Cartagena)
1169
1170 REMAINING 17 ENTRIES SKIPPED
1171
1172 ---- Y Cantidad de producto l transportado de la bodega j al cliente k
1173
1174 Y(Cartagena,clientel,AC)
1175      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1176      410.8216 FuncionObjetivo
1177      1      Demanda(clientel,AC)
1178      1      Balance(Cartagena,AC)
1179
1180 Y(Cartagena,clientel,CC)
1181      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1182      419.3586 FuncionObjetivo
1183      1      Demanda(clientel,CC)
1184      1      Balance(Cartagena,CC)
1185
1186 Y(Cartagena,clientel,HIPC)
1187      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1188      407.0901 FuncionObjetivo
1189      1      Demanda(clientel,HIPC)
1190      1      Balance(Cartagena,HIPC)
1191
1192 REMAINING 357 ENTRIES SKIPPED
1193
1194 ---- Z Variable binaria que indica la apertura de una bodega j

```



```

1195
1196 Z(Cartagena)
1197      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, 1, 0)
1198      -2.400000E+6 Almacenamiento(Cartagena)
1199
1200 Z(Barranquilla)
1201      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, 1, 0)
1202      3.000000E+7 FuncionObjetivo
1203      -2.400000E+6 Almacenamiento(Barranquilla)
1204
1205 Z(Medellin)
1206      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, 1, 0)
1207      -6.000000E+6 Almacenamiento(Medellin)
1208
1209 REMAINING 2 ENTRIES SKIPPED
1210
1211 ---- CT Costo total
1212
1213 CT
1214      (.LO, .L, .UP, .M = -INF, 0, +INF, 0)
1215      -1 FuncionObjetivo
1216
1217 GAMS 24.6.1 r55820 Released Jan 18, 2016 WIN-VS8 x86 32bit/MS Windows 11/16/17»
1218      17:24:16 Page 4
1219 General Algebraic Modeling System
1220 Model Statistics SOLVE QuimicosSA Using MIP From line 167
1221
1222 MODEL STATISTICS
1223
1224 BLOCKS OF EQUATIONS          5      SINGLE EQUATIONS          102
1225 BLOCKS OF VARIABLES          4      SINGLE VARIABLES          386
1226 NON ZERO ELEMENTS          1,168    DISCRETE VARIABLES          5
1227
1228
1229 GENERATION TIME      =          0.063 SECONDS      4 MB 24.6.1 r55820 WIN-VS8
1230
1231
1232 EXECUTION TIME      =          0.063 SECONDS      4 MB 24.6.1 r55820 WIN-VS8
1233 GAMS 24.6.1 r55820 Released Jan 18, 2016 WIN-VS8 x86 32bit/MS Windows 11/16/17»
1234      17:24:16 Page 5
1235 General Algebraic Modeling System
1236 Solution Report SOLVE QuimicosSA Using MIP From line 167
1237
1238
1239
1240      S O L V E      S U M M A R Y
1241
1242      MODEL QuimicosSA      OBJECTIVE CT
1243      TYPE MIP      DIRECTION MINIMIZE
1244      SOLVER CPLEX      FROM LINE 167
1245
1246
1247
1248 ***** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
1249 ***** MODEL STATUS      8 Integer Solution
1250 ***** OBJECTIVE VALUE      2170758769.6786
1251
1252
1253
1254 RESOURCE USAGE, LIMIT      0.078      1000.000
1255 ITERATION COUNT, LIMIT      48      2000000000

```

```

1250
1251 IBM ILOG CPLEX 24.6.1 r55820 Released Jan 18, 2016 VS8 x86 32bit/MS Windows
1252 --- GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems.
1253 Cplex 12.6.3.0
1254
1255 Space for names approximately 0.01 Mb
1256 Use option 'names no' to turn use of names off
1257 MIP status(102): integer optimal, tolerance
1258 Cplex Time: 0.03sec (det. 0.66 ticks)
1259 Fixing integer variables, and solving final LP...
1260 Fixed MIP status(1): optimal
1261 Cplex Time: 0.00sec (det. 0.29 ticks)
1262 Solution satisfies tolerances.
1263
1264 MIP Solution: 2242453880.855890 (25 iterations, 0 nodes)
1265 Final Solve: 2170758769.678630 (23 iterations)
1266
1267 Best possible: 2115469986.345296
1268 Absolute gap: 126983894.510594
1269 Relative gap: 0.056627
1270
1271
1272 LOWER LEVEL UPPER MARGINAL
1273
1274 ---- EQU FuncionOb~ . . . -1.000
1275
1276 FuncionObjetivo define la función objetivo
1277
1278 ---- EQU Demanda Satisface la demanda del cliente k del producto l
1279
1280 LOWER LEVEL UPPER MARGINAL
1281
1282 cliente1 .AC . . . .
1283 cliente1 .CC 1.0361E+6 1.0361E+6 1.0361E+6 387.628
1284 cliente1 .HIPC . . . .
1285 cliente1 .PS . . . .
1286 cliente2 .AC . . . .
1287 cliente2 .CC . . . .
1288 cliente2 .HIPC 7.9686E+5 7.9686E+5 7.9686E+5 505.400
1289 cliente2 .PS . . . .
1290 cliente3 .AC 2.4025E+5 2.4025E+5 2.4025E+5 327.042
1291 cliente3 .CC 4.0500E+5 4.0500E+5 4.0500E+5 387.628
1292 cliente3 .HIPC . . . .
1293 cliente3 .PS . . . .
1294 cliente4 .AC 4.8395E+5 4.8395E+5 4.8395E+5 512.863
1295 cliente4 .CC . . . .
1296 cliente4 .HIPC . . . .
1297 cliente4 .PS . . . .
1298 cliente5 .AC . . . .
1299 cliente5 .CC . . . .
1300 cliente5 .HIPC . . . .
1301 cliente5 .PS 4.6708E+5 4.6708E+5 4.6708E+5 607.306
1302 cliente6 .AC 4.0644E+5 4.0644E+5 4.0644E+5 327.042
1303 cliente6 .CC 20000.000 20000.000 20000.000 387.628
1304 cliente6 .HIPC . . . .
1305 cliente6 .PS . . . .
1306 cliente7 .AC 3.2965E+5 3.2965E+5 3.2965E+5 521.844

```

1307	cliente7	.CC	18800.000	18800.000	18800.000	590.967
1308	cliente7	.HIPC	.	.	.	.
1309	cliente7	.PS	.	.	.	.
1310	cliente8	.AC	.	.	.	.
1311	cliente8	.CC	.	.	.	.
1312	cliente8	.HIPC	.	.	.	.
1313	cliente8	.PS	1.1858E+5	1.1858E+5	1.1858E+5	560.819
1314	cliente9	.AC	.	.	.	.
1315	cliente9	.CC	.	.	.	.
1316	cliente9	.HIPC	.	.	.	.
1317	cliente9	.PS	68645.000	68645.000	68645.000	600.226
1318	cliente10	.AC	.	.	.	.
1319	cliente10	.CC	.	.	.	.
1320	cliente10	.HIPC	.	.	.	.
1321	cliente10	.PS	68585.000	68585.000	68585.000	210.195
1322	cliente11	.AC	32000.000	32000.000	32000.000	336.023
1323	cliente11	.CC	4000.000	4000.000	4000.000	400.877
1324	cliente11	.HIPC	.	.	.	.
1325	cliente11	.PS	.	.	.	.
1326	cliente12	.AC	35808.000	35808.000	35808.000	512.863
1327	cliente12	.CC	.	.	.	.
1328	cliente12	.HIPC	.	.	.	.
1329	cliente12	.PS	.	.	.	.
1330	cliente13	.AC	.	.	.	.
1331	cliente13	.CC	.	.	.	.
1332	cliente13	.HIPC	.	.	.	.
1333	cliente13	.PS	30597.000	30597.000	30597.000	560.819
1334	cliente14	.AC	23714.000	23714.000	23714.000	512.863
1335	cliente14	.CC	4000.000	4000.000	4000.000	577.717
1336	cliente14	.HIPC	.	.	.	.
1337	cliente14	.PS	.	.	.	.
1338	cliente15	.AC	.	.	.	.
1339	cliente15	.CC	.	.	.	.
1340	cliente15	.HIPC	.	.	.	.
1341	cliente15	.PS	24940.000	24940.000	24940.000	560.819
1342	cliente16	.AC	.	.	.	.
1343	cliente16	.CC	.	.	.	.
1344	cliente16	.HIPC	19680.000	19680.000	19680.000	321.445
1345	cliente16	.PS	.	.	.	.
1346	cliente17	.AC	.	.	.	.
1347	cliente17	.CC	.	.	.	.
1348	cliente17	.HIPC	14620.000	14620.000	14620.000	536.925
1349	cliente17	.PS	.	.	.	.
1350	cliente18	.AC	10000.000	10000.000	10000.000	254.822
1351	cliente18	.CC	.	.	.	.
1352	cliente18	.HIPC	.	.	.	.
1353	cliente18	.PS	.	.	.	.
1354						
1355	----	EQU Balance	Garantiza el balance del flujo entre la planta i bodega j cliente k y producto l			
1356						
1357						
1358			LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1359						
1360	Cartagena	.AC	.	.	.	-93.861
1361	Cartagena	.CC	.	.	.	-145.909
1362	Cartagena	.HIPC	.	.	.	-91.995
1363	Cartagena	.PS	.	.	.	-123.767

1364	Barranquilla.AC	.	.	.	-174.411
1365	Barranquilla.CC	.	.	.	-226.459
1366	Barranquilla.HIPC	.	.	.	-172.545
1367	Barranquilla.PS	.	.	.	-204.317
1368	Medellin.AC	.	.	.	-239.492
1369	Medellin.CC	.	.	.	-295.809
1370	Medellin.HIPC	.	.	.	-235.760
1371	Medellin.PS	.	.	.	-275.415
1372	Bogota.AC	.	.	.	-408.052
1373	Bogota.CC	.	.	.	-468.638
1374	Bogota.HIPC	.	.	.	-402.455
1375	Bogota.PS	.	.	.	-449.992
1376	Cali.AC	.	.	.	-458.703
1377	Cali.CC	.	.	.	-523.557
1378	Cali.HIPC	.	.	.	-451.240
1379	Cali.PS	.	.	.	-506.659

1380

1381 ---- EQU Capacidad Garantiza la capacidad productiva del producto l

1382

1383 LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

1384

1385 AC -INF 1.5618E+6 2.3000E+6 .

1386 CC -INF 1.4878E+6 2.0000E+6 .

1387 HIPC -INF 8.3116E+5 1.5000E+6 .

1388 PS -INF 7.7843E+5 1.3000E+6 .

1389

1390 ---- EQU Almacenamiento Garantiza la capacidad de almacenamiento de la bodega j

1391

1392 LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

1393

1394 Cartagena -INF -2.331E+6 . .

1395 Barranquilla -INF -2.390E+6 . .

1396 Medellin -INF -3.837E+6 . .

1397 Bogota -INF -2.933E+6 . .

1398 Cali -INF -3.050E+6 . .

1399

1400 ---- VAR X cantidad de producto l transportado de la planta i a la bodega j

1401

1402 LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

1403

1404 Cartagena.Cartagena .AC . . +INF .

1405 Cartagena.Cartagena .CC . . +INF .

1406 Cartagena.Cartagena .HIPC . . +INF .

1407 Cartagena.Cartagena .PS . 68585.000 +INF .

1408 Cartagena.Barranquilla.AC . 10000.000 +INF .

1409 Cartagena.Barranquilla.CC . . +INF .

1410 Cartagena.Barranquilla.HIPC . . +INF .

1411 Cartagena.Barranquilla.PS . . +INF .

1412 Cartagena.Medellin .AC . 6.7870E+5 +INF .

1413 Cartagena.Medellin .CC . 1.4651E+6 +INF .

1414 Cartagena.Medellin .HIPC . 19680.000 +INF .

1415 Cartagena.Medellin .PS . . +INF .

1416 Cartagena.Bogota .AC . 8.7312E+5 +INF .

1417 Cartagena.Bogota .CC . 22800.000 +INF .

1418 Cartagena.Bogota .HIPC . 7.9686E+5 +INF .

1419 Cartagena.Bogota .PS . 1.7412E+5 +INF .

1420 Cartagena.Cali .AC . . +INF .

```

1421 Cartagena.Cali      .CC      .      .      +INF      .
1422 Cartagena.Cali      .HIPC     .      14620.000  +INF      .
1423 Cartagena.Cali      .PS      .      5.3573E+5  +INF      .
1424
1425 ---- VAR Y  Cantidad de producto l transportado de la bodega j al cliente k
1426
1427                      LOWER      LEVEL      UPPER      MARGINAL
1428
1429 Cartagena .cliente1 .AC      .      .      +INF      504.682
1430 Cartagena .cliente1 .CC      .      .      +INF      177.640
1431 Cartagena .cliente1 .HIPC     .      .      +INF      499.085
1432 Cartagena .cliente1 .PS      .      .      +INF      546.622
1433 Cartagena .cliente2 .AC      .      .      +INF      710.093
1434 Cartagena .cliente2 .CC      .      .      +INF      774.947
1435 Cartagena .cliente2 .HIPC     .      .      +INF      197.230
1436 Cartagena .cliente2 .PS      .      .      +INF      758.049
1437 Cartagena .cliente3 .AC      .      .      +INF      177.640
1438 Cartagena .cliente3 .CC      .      .      +INF      177.640
1439 Cartagena .cliente3 .HIPC     .      .      +INF      499.085
1440 Cartagena .cliente3 .PS      .      .      +INF      546.622
1441 Cartagena .cliente4 .AC      .      .      +INF      197.230
1442 Cartagena .cliente4 .CC      .      .      +INF      774.947
1443 Cartagena .cliente4 .HIPC     .      .      +INF      702.630
1444 Cartagena .cliente4 .PS      .      .      +INF      758.049
1445 Cartagena .cliente5 .AC      .      .      +INF      938.705
1446 Cartagena .cliente5 .CC      .      .      +INF      1012.096
1447 Cartagena .cliente5 .HIPC     .      .      +INF      927.510
1448 Cartagena .cliente5 .PS      .      .      +INF      391.387
1449 Cartagena .cliente6 .AC      .      .      +INF      177.640
1450 Cartagena .cliente6 .CC      .      .      +INF      177.640
1451 Cartagena .cliente6 .HIPC     .      .      +INF      499.085
1452 Cartagena .cliente6 .PS      .      .      +INF      546.622
1453 Cartagena .cliente7 .AC      .      .      +INF      197.230
1454 Cartagena .cliente7 .CC      .      .      +INF      197.230
1455 Cartagena .cliente7 .HIPC     .      .      +INF      709.745
1456 Cartagena .cliente7 .PS      .      .      +INF      773.046
1457 Cartagena .cliente8 .AC      .      .      +INF      710.093
1458 Cartagena .cliente8 .CC      .      .      +INF      774.947
1459 Cartagena .cliente8 .HIPC     .      .      +INF      702.630
1460 Cartagena .cliente8 .PS      .      .      +INF      197.230
1461 Cartagena .cliente9 .AC      .      .      +INF      701.214
1462 Cartagena .cliente9 .CC      .      .      +INF      770.337
1463 Cartagena .cliente9 .HIPC     .      .      +INF      691.885
1464 Cartagena .cliente9 .PS      .      .      +INF      154.960
1465 Cartagena .cliente10.AC      .      .      +INF      174.272
1466 Cartagena .cliente10.CC      .      .      +INF      230.589
1467 Cartagena .cliente10.HIPC     .      .      +INF      170.540
1468 Cartagena .cliente10.PS      .      68585.000  +INF      .
1469 Cartagena .cliente11.AC      .      .      +INF      222.229
1470 Cartagena .cliente11.CC      .      .      +INF      217.961
1471 Cartagena .cliente11.HIPC     .      .      +INF      552.655
1472 Cartagena .cliente11.PS      .      .      +INF      600.192
1473 Cartagena .cliente12.AC      .      .      +INF      197.230
1474 Cartagena .cliente12.CC      .      .      +INF      774.947
1475 Cartagena .cliente12.HIPC     .      .      +INF      702.630
1476 Cartagena .cliente12.PS      .      .      +INF      758.049
1477 Cartagena .cliente13.AC      .      .      +INF      710.093

```

1478	Cartagena	.cliente13.CC	.	.	+INF	774.947
1479	Cartagena	.cliente13.HIPC	.	.	+INF	702.630
1480	Cartagena	.cliente13.PS	.	.	+INF	197.230
1481	Cartagena	.cliente14.AC	.	.	+INF	197.230
1482	Cartagena	.cliente14.CC	.	.	+INF	197.230
1483	Cartagena	.cliente14.HIPC	.	.	+INF	702.630
1484	Cartagena	.cliente14.PS	.	.	+INF	758.049
1485	Cartagena	.cliente15.AC	.	.	+INF	710.093
1486	Cartagena	.cliente15.CC	.	.	+INF	774.947
1487	Cartagena	.cliente15.HIPC	.	.	+INF	702.630
1488	Cartagena	.cliente15.PS	.	.	+INF	197.230
1489	Cartagena	.cliente16.AC	.	.	+INF	504.682
1490	Cartagena	.cliente16.CC	.	.	+INF	565.268
1491	Cartagena	.cliente16.HIPC	.	.	+INF	177.640
1492	Cartagena	.cliente16.PS	.	.	+INF	546.622
1493	Cartagena	.cliente17.AC	.	.	+INF	701.214
1494	Cartagena	.cliente17.CC	.	.	+INF	770.337
1495	Cartagena	.cliente17.HIPC	.	.	+INF	154.960
1496	Cartagena	.cliente17.PS	.	.	+INF	755.186
1497	Cartagena	.cliente18.AC	.	.	+INF	80.160
1498	Cartagena	.cliente18.CC	.	.	+INF	391.299
1499	Cartagena	.cliente18.HIPC	.	.	+INF	331.250
1500	Cartagena	.cliente18.PS	.	.	+INF	370.905
1501	Barranquilla	.cliente1.AC	.	.	+INF	713.202
1502	Barranquilla	.cliente1.CC	.	.	+INF	386.160
1503	Barranquilla	.cliente1.HIPC	.	.	+INF	707.605
1504	Barranquilla	.cliente1.PS	.	.	+INF	755.142
1505	Barranquilla	.cliente2.AC	.	.	+INF	826.353
1506	Barranquilla	.cliente2.CC	.	.	+INF	891.207
1507	Barranquilla	.cliente2.HIPC	.	.	+INF	313.490
1508	Barranquilla	.cliente2.PS	.	.	+INF	874.309
1509	Barranquilla	.cliente3.AC	.	.	+INF	386.160
1510	Barranquilla	.cliente3.CC	.	.	+INF	386.160
1511	Barranquilla	.cliente3.HIPC	.	.	+INF	707.605
1512	Barranquilla	.cliente3.PS	.	.	+INF	755.142
1513	Barranquilla	.cliente4.AC	.	.	+INF	313.490
1514	Barranquilla	.cliente4.CC	.	.	+INF	891.207
1515	Barranquilla	.cliente4.HIPC	.	.	+INF	818.890
1516	Barranquilla	.cliente4.PS	.	.	+INF	874.309
1517	Barranquilla	.cliente5.AC	.	.	+INF	1147.235
1518	Barranquilla	.cliente5.CC	.	.	+INF	1220.626
1519	Barranquilla	.cliente5.HIPC	.	.	+INF	1136.040
1520	Barranquilla	.cliente5.PS	.	.	+INF	599.917
1521	Barranquilla	.cliente6.AC	.	.	+INF	386.160
1522	Barranquilla	.cliente6.CC	.	.	+INF	386.160
1523	Barranquilla	.cliente6.HIPC	.	.	+INF	707.605
1524	Barranquilla	.cliente6.PS	.	.	+INF	755.142
1525	Barranquilla	.cliente7.AC	.	.	+INF	313.490
1526	Barranquilla	.cliente7.CC	.	.	+INF	313.490
1527	Barranquilla	.cliente7.HIPC	.	.	+INF	826.005
1528	Barranquilla	.cliente7.PS	.	.	+INF	889.306
1529	Barranquilla	.cliente8.AC	.	.	+INF	826.353
1530	Barranquilla	.cliente8.CC	.	.	+INF	891.207
1531	Barranquilla	.cliente8.HIPC	.	.	+INF	818.890
1532	Barranquilla	.cliente8.PS	.	.	+INF	313.490
1533	Barranquilla	.cliente9.AC	.	.	+INF	939.504
1534	Barranquilla	.cliente9.CC	.	.	+INF	1008.627

1535	Barranquilla.cliente9	.HIPC	.	.	+INF	930.175	
1536	Barranquilla.cliente9	.PS	.	.	+INF	393.250	
1537	Barranquilla.cliente10	.AC	.	.	+INF	454.222	
1538	Barranquilla.cliente10	.CC	.	.	+INF	510.539	
1539	Barranquilla.cliente10	.HIPC	.	.	+INF	450.490	
1540	Barranquilla.cliente10	.PS	.	.	+INF	279.950	
1541	Barranquilla.cliente11	.AC	.	.	+INF	377.179	
1542	Barranquilla.cliente11	.CC	.	.	+INF	372.911	
1543	Barranquilla.cliente11	.HIPC	.	.	+INF	707.605	
1544	Barranquilla.cliente11	.PS	.	.	+INF	755.142	
1545	Barranquilla.cliente12	.AC	.	.	+INF	313.490	
1546	Barranquilla.cliente12	.CC	.	.	+INF	891.207	
1547	Barranquilla.cliente12	.HIPC	.	.	+INF	818.890	
1548	Barranquilla.cliente12	.PS	.	.	+INF	874.309	
1549	Barranquilla.cliente13	.AC	.	.	+INF	826.353	
1550	Barranquilla.cliente13	.CC	.	.	+INF	891.207	
1551	Barranquilla.cliente13	.HIPC	.	.	+INF	818.890	
1552	Barranquilla.cliente13	.PS	.	.	+INF	313.490	
1553	Barranquilla.cliente14	.AC	.	.	+INF	313.490	
1554	Barranquilla.cliente14	.CC	.	.	+INF	313.490	
1555	Barranquilla.cliente14	.HIPC	.	.	+INF	818.890	
1556	Barranquilla.cliente14	.PS	.	.	+INF	874.309	
1557	Barranquilla.cliente15	.AC	.	.	+INF	826.353	
1558	Barranquilla.cliente15	.CC	.	.	+INF	891.207	
1559	Barranquilla.cliente15	.HIPC	.	.	+INF	818.890	
1560	Barranquilla.cliente15	.PS	.	.	+INF	313.490	
1561	Barranquilla.cliente16	.AC	.	.	+INF	713.202	
1562	Barranquilla.cliente16	.CC	.	.	+INF	773.788	
1563	Barranquilla.cliente16	.HIPC	.	.	+INF	386.160	
1564	Barranquilla.cliente16	.PS	.	.	+INF	755.142	
1565	Barranquilla.cliente17	.AC	.	.	+INF	939.504	
1566	Barranquilla.cliente17	.CC	.	.	+INF	1008.627	
1567	Barranquilla.cliente17	.HIPC	.	.	+INF	393.250	
1568	Barranquilla.cliente17	.PS	.	.	+INF	993.476	
1569	Barranquilla.cliente18	.AC	.	10000.000	+INF	.	
1570	Barranquilla.cliente18	.CC	.	.	+INF	311.139	
1571	Barranquilla.cliente18	.HIPC	.	.	+INF	251.090	
1572	Barranquilla.cliente18	.PS	.	.	+INF	290.745	
1573	Medellin	.cliente1	.AC	.	+INF	327.042	
1574	Medellin	.cliente1	.CC	.	1.0361E+6	+INF	.
1575	Medellin	.cliente1	.HIPC	.	.	+INF	321.445
1576	Medellin	.cliente1	.PS	.	.	+INF	368.982
1577	Medellin	.cliente2	.AC	.	.	+INF	576.383
1578	Medellin	.cliente2	.CC	.	.	+INF	641.237
1579	Medellin	.cliente2	.HIPC	.	.	+INF	63.520
1580	Medellin	.cliente2	.PS	.	.	+INF	624.339
1581	Medellin	.cliente3	.AC	.	2.4025E+5	+INF	.
1582	Medellin	.cliente3	.CC	.	4.0500E+5	+INF	.
1583	Medellin	.cliente3	.HIPC	.	.	+INF	321.445
1584	Medellin	.cliente3	.PS	.	.	+INF	368.982
1585	Medellin	.cliente4	.AC	.	.	+INF	63.520
1586	Medellin	.cliente4	.CC	.	.	+INF	641.237
1587	Medellin	.cliente4	.HIPC	.	.	+INF	568.920
1588	Medellin	.cliente4	.PS	.	.	+INF	624.339
1589	Medellin	.cliente5	.AC	.	.	+INF	615.364
1590	Medellin	.cliente5	.CC	.	.	+INF	684.487
1591	Medellin	.cliente5	.HIPC	.	.	+INF	606.035

1592	Medellin	.cliente5	.PS	.	.	+INF	62.030
1593	Medellin	.cliente6	.AC	.	4.0644E+5	+INF	.
1594	Medellin	.cliente6	.CC	.	20000.000	+INF	.
1595	Medellin	.cliente6	.HIPC	.	.	+INF	321.445
1596	Medellin	.cliente6	.PS	.	.	+INF	368.982
1597	Medellin	.cliente7	.AC	.	.	+INF	54.539
1598	Medellin	.cliente7	.CC	.	.	+INF	50.271
1599	Medellin	.cliente7	.HIPC	.	.	+INF	568.920
1600	Medellin	.cliente7	.PS	.	.	+INF	624.339
1601	Medellin	.cliente8	.AC	.	.	+INF	577.383
1602	Medellin	.cliente8	.CC	.	.	+INF	642.237
1603	Medellin	.cliente8	.HIPC	.	.	+INF	569.920
1604	Medellin	.cliente8	.PS	.	.	+INF	64.520
1605	Medellin	.cliente9	.AC	.	.	+INF	578.883
1606	Medellin	.cliente9	.CC	.	.	+INF	643.737
1607	Medellin	.cliente9	.HIPC	.	.	+INF	571.420
1608	Medellin	.cliente9	.PS	.	.	+INF	26.613
1609	Medellin	.cliente10	.AC	.	.	+INF	682.453
1610	Medellin	.cliente10	.CC	.	.	+INF	747.307
1611	Medellin	.cliente10	.HIPC	.	.	+INF	674.990
1612	Medellin	.cliente10	.PS	.	.	+INF	520.215
1613	Medellin	.cliente11	.AC	.	32000.000	+INF	.
1614	Medellin	.cliente11	.CC	.	4000.000	+INF	.
1615	Medellin	.cliente11	.HIPC	.	.	+INF	328.560
1616	Medellin	.cliente11	.PS	.	.	+INF	383.979
1617	Medellin	.cliente12	.AC	.	.	+INF	63.520
1618	Medellin	.cliente12	.CC	.	.	+INF	641.237
1619	Medellin	.cliente12	.HIPC	.	.	+INF	568.920
1620	Medellin	.cliente12	.PS	.	.	+INF	624.339
1621	Medellin	.cliente13	.AC	.	.	+INF	576.383
1622	Medellin	.cliente13	.CC	.	.	+INF	641.237
1623	Medellin	.cliente13	.HIPC	.	.	+INF	568.920
1624	Medellin	.cliente13	.PS	.	.	+INF	63.520
1625	Medellin	.cliente14	.AC	.	.	+INF	63.520
1626	Medellin	.cliente14	.CC	.	.	+INF	63.520
1627	Medellin	.cliente14	.HIPC	.	.	+INF	568.920
1628	Medellin	.cliente14	.PS	.	.	+INF	624.339
1629	Medellin	.cliente15	.AC	.	.	+INF	576.383
1630	Medellin	.cliente15	.CC	.	.	+INF	641.237
1631	Medellin	.cliente15	.HIPC	.	.	+INF	568.920
1632	Medellin	.cliente15	.PS	.	.	+INF	63.520
1633	Medellin	.cliente16	.AC	.	.	+INF	327.042
1634	Medellin	.cliente16	.CC	.	.	+INF	387.628
1635	Medellin	.cliente16	.HIPC	.	19680.000	+INF	.
1636	Medellin	.cliente16	.PS	.	.	+INF	368.982
1637	Medellin	.cliente17	.AC	.	.	+INF	578.883
1638	Medellin	.cliente17	.CC	.	.	+INF	643.737
1639	Medellin	.cliente17	.HIPC	.	.	+INF	34.495
1640	Medellin	.cliente17	.PS	.	.	+INF	626.839
1641	Medellin	.cliente18	.AC	.	.	+INF	471.202
1642	Medellin	.cliente18	.CC	.	.	+INF	790.877
1643	Medellin	.cliente18	.HIPC	.	.	+INF	718.560
1644	Medellin	.cliente18	.PS	.	.	+INF	773.979
1645	Bogota	.cliente1	.AC	.	.	+INF	798.094
1646	Bogota	.cliente1	.CC	.	.	+INF	479.589
1647	Bogota	.cliente1	.HIPC	.	.	+INF	788.765
1648	Bogota	.cliente1	.PS	.	.	+INF	852.066

1649	Bogota	.cliente2	.AC	.	.	+INF	512.863
1650	Bogota	.cliente2	.CC	.	.	+INF	577.717
1651	Bogota	.cliente2	.HIPC	.	7.9686E+5	+INF	.
1652	Bogota	.cliente2	.PS	.	.	+INF	560.819
1653	Bogota	.cliente3	.AC	.	.	+INF	471.052
1654	Bogota	.cliente3	.CC	.	.	+INF	479.589
1655	Bogota	.cliente3	.HIPC	.	.	+INF	788.765
1656	Bogota	.cliente3	.PS	.	.	+INF	852.066
1657	Bogota	.cliente4	.AC	.	4.8395E+5	+INF	.
1658	Bogota	.cliente4	.CC	.	.	+INF	577.717
1659	Bogota	.cliente4	.HIPC	.	.	+INF	505.400
1660	Bogota	.cliente4	.PS	.	.	+INF	560.819
1661	Bogota	.cliente5	.AC	.	.	+INF	1214.165
1662	Bogota	.cliente5	.CC	.	.	+INF	1287.556
1663	Bogota	.cliente5	.HIPC	.	.	+INF	1202.970
1664	Bogota	.cliente5	.PS	.	.	+INF	666.847
1665	Bogota	.cliente6	.AC	.	.	+INF	471.052
1666	Bogota	.cliente6	.CC	.	.	+INF	479.589
1667	Bogota	.cliente6	.HIPC	.	.	+INF	788.765
1668	Bogota	.cliente6	.PS	.	.	+INF	852.066
1669	Bogota	.cliente7	.AC	.	3.2965E+5	+INF	.
1670	Bogota	.cliente7	.CC	.	18800.000	+INF	.
1671	Bogota	.cliente7	.HIPC	.	.	+INF	512.515
1672	Bogota	.cliente7	.PS	.	.	+INF	575.816
1673	Bogota	.cliente8	.AC	.	.	+INF	512.863
1674	Bogota	.cliente8	.CC	.	.	+INF	577.717
1675	Bogota	.cliente8	.HIPC	.	.	+INF	505.400
1676	Bogota	.cliente8	.PS	.	1.1858E+5	+INF	.
1677	Bogota	.cliente9	.AC	.	.	+INF	838.514
1678	Bogota	.cliente9	.CC	.	.	+INF	907.637
1679	Bogota	.cliente9	.HIPC	.	.	+INF	829.185
1680	Bogota	.cliente9	.PS	.	.	+INF	292.260
1681	Bogota	.cliente10	.AC	.	.	+INF	1122.495
1682	Bogota	.cliente10	.CC	.	.	+INF	1195.886
1683	Bogota	.cliente10	.HIPC	.	.	+INF	1111.300
1684	Bogota	.cliente10	.PS	.	.	+INF	972.289
1685	Bogota	.cliente11	.AC	.	.	+INF	463.071
1686	Bogota	.cliente11	.CC	.	.	+INF	467.339
1687	Bogota	.cliente11	.HIPC	.	.	+INF	789.765
1688	Bogota	.cliente11	.PS	.	.	+INF	853.066
1689	Bogota	.cliente12	.AC	.	35808.000	+INF	.
1690	Bogota	.cliente12	.CC	.	.	+INF	577.717
1691	Bogota	.cliente12	.HIPC	.	.	+INF	505.400
1692	Bogota	.cliente12	.PS	.	.	+INF	560.819
1693	Bogota	.cliente13	.AC	.	.	+INF	512.863
1694	Bogota	.cliente13	.CC	.	.	+INF	577.717
1695	Bogota	.cliente13	.HIPC	.	.	+INF	505.400
1696	Bogota	.cliente13	.PS	.	30597.000	+INF	.
1697	Bogota	.cliente14	.AC	.	23714.000	+INF	.
1698	Bogota	.cliente14	.CC	.	4000.000	+INF	.
1699	Bogota	.cliente14	.HIPC	.	.	+INF	505.400
1700	Bogota	.cliente14	.PS	.	.	+INF	560.819
1701	Bogota	.cliente15	.AC	.	.	+INF	512.863
1702	Bogota	.cliente15	.CC	.	.	+INF	577.717
1703	Bogota	.cliente15	.HIPC	.	.	+INF	505.400
1704	Bogota	.cliente15	.PS	.	24940.000	+INF	.
1705	Bogota	.cliente16	.AC	.	.	+INF	798.094

1706	Bogota	.cliente16.CC	.	.	+INF	867.217
1707	Bogota	.cliente16.HIPC	.	.	+INF	467.320
1708	Bogota	.cliente16.PS	.	.	+INF	852.066
1709	Bogota	.cliente17.AC	.	.	+INF	838.514
1710	Bogota	.cliente17.CC	.	.	+INF	907.637
1711	Bogota	.cliente17.HIPC	.	.	+INF	292.260
1712	Bogota	.cliente17.PS	.	.	+INF	892.486
1713	Bogota	.cliente18.AC	.	.	+INF	805.173
1714	Bogota	.cliente18.CC	.	.	+INF	1133.386
1715	Bogota	.cliente18.HIPC	.	.	+INF	1048.800
1716	Bogota	.cliente18.PS	.	.	+INF	1119.984
1717	Cali	.cliente1.AC	.	.	+INF	798.095
1718	Cali	.cliente1.CC	.	.	+INF	483.858
1719	Cali	.cliente1.HIPC	.	.	+INF	786.900
1720	Cali	.cliente1.PS	.	.	+INF	858.084
1721	Cali	.cliente2.AC	.	.	+INF	827.485
1722	Cali	.cliente2.CC	.	.	+INF	900.876
1723	Cali	.cliente2.HIPC	.	.	+INF	310.890
1724	Cali	.cliente2.PS	.	.	+INF	887.474
1725	Cali	.cliente3.AC	.	.	+INF	471.052
1726	Cali	.cliente3.CC	.	.	+INF	483.858
1727	Cali	.cliente3.HIPC	.	.	+INF	786.900
1728	Cali	.cliente3.PS	.	.	+INF	858.084
1729	Cali	.cliente4.AC	.	.	+INF	314.622
1730	Cali	.cliente4.CC	.	.	+INF	900.876
1731	Cali	.cliente4.HIPC	.	.	+INF	816.290
1732	Cali	.cliente4.PS	.	.	+INF	887.474
1733	Cali	.cliente5.AC	.	.	+INF	553.334
1734	Cali	.cliente5.CC	.	.	+INF	622.457
1735	Cali	.cliente5.HIPC	.	.	+INF	544.005
1736	Cali	.cliente5.PS	.	4.6708E+5	+INF	.
1737	Cali	.cliente6.AC	.	.	+INF	471.052
1738	Cali	.cliente6.CC	.	.	+INF	483.858
1739	Cali	.cliente6.HIPC	.	.	+INF	786.900
1740	Cali	.cliente6.PS	.	.	+INF	858.084
1741	Cali	.cliente7.AC	.	.	+INF	296.660
1742	Cali	.cliente7.CC	.	.	+INF	296.660
1743	Cali	.cliente7.HIPC	.	.	+INF	809.175
1744	Cali	.cliente7.PS	.	.	+INF	872.476
1745	Cali	.cliente8.AC	.	.	+INF	827.485
1746	Cali	.cliente8.CC	.	.	+INF	900.876
1747	Cali	.cliente8.HIPC	.	.	+INF	816.290
1748	Cali	.cliente8.PS	.	.	+INF	326.655
1749	Cali	.cliente9.AC	.	.	+INF	546.254
1750	Cali	.cliente9.CC	.	.	+INF	615.377
1751	Cali	.cliente9.HIPC	.	.	+INF	536.925
1752	Cali	.cliente9.PS	.	68645.000	+INF	.
1753	Cali	.cliente10.AC	.	.	+INF	1066.057
1754	Cali	.cliente10.CC	.	.	+INF	1147.985
1755	Cali	.cliente10.HIPC	.	.	+INF	1051.131
1756	Cali	.cliente10.PS	.	.	+INF	927.884
1757	Cali	.cliente11.AC	.	.	+INF	471.052
1758	Cali	.cliente11.CC	.	.	+INF	483.858
1759	Cali	.cliente11.HIPC	.	.	+INF	794.015
1760	Cali	.cliente11.PS	.	.	+INF	873.081
1761	Cali	.cliente12.AC	.	.	+INF	314.622
1762	Cali	.cliente12.CC	.	.	+INF	900.876

```

1763 Cali      .cliente12.HIPC      .      .      +INF      816.290
1764 Cali      .cliente12.PS      .      .      +INF      887.474
1765 Cali      .cliente13.AC      .      .      +INF      827.485
1766 Cali      .cliente13.CC      .      .      +INF      900.876
1767 Cali      .cliente13.HIPC      .      .      +INF      816.290
1768 Cali      .cliente13.PS      .      .      +INF      326.655
1769 Cali      .cliente14.AC      .      .      +INF      314.622
1770 Cali      .cliente14.CC      .      .      +INF      323.159
1771 Cali      .cliente14.HIPC      .      .      +INF      816.290
1772 Cali      .cliente14.PS      .      .      +INF      887.474
1773 Cali      .cliente15.AC      .      .      +INF      827.485
1774 Cali      .cliente15.CC      .      .      +INF      900.876
1775 Cali      .cliente15.HIPC      .      .      +INF      816.290
1776 Cali      .cliente15.PS      .      .      +INF      326.655
1777 Cali      .cliente16.AC      .      .      +INF      798.095
1778 Cali      .cliente16.CC      .      .      +INF      871.486
1779 Cali      .cliente16.HIPC      .      .      +INF      465.455
1780 Cali      .cliente16.PS      .      .      +INF      858.084
1781 Cali      .cliente17.AC      .      .      +INF      546.254
1782 Cali      .cliente17.CC      .      .      +INF      615.377
1783 Cali      .cliente17.HIPC      .      14620.000      +INF      .
1784 Cali      .cliente17.PS      .      .      +INF      600.226
1785 Cali      .cliente18.AC      .      .      +INF      927.305
1786 Cali      .cliente18.CC      .      .      +INF      1264.055
1787 Cali      .cliente18.HIPC      .      .      +INF      1167.201
1788 Cali      .cliente18.PS      .      .      +INF      1254.148
1789
1790 ---- VAR Z      Variable binaria que indica la apertura de una bodega j
1791
1792              LOWER      LEVEL      UPPER      MARGINAL
1793
1794 Cartagena      .      1.000      1.000      EPS
1795 Barranquilla      .      1.000      1.000      3.0000E+7
1796 Medellin      .      1.000      1.000      EPS
1797 Bogota      .      1.000      1.000      EPS
1798 Cali      .      1.000      1.000      3.0000E+7
1799
1800              LOWER      LEVEL      UPPER      MARGINAL
1801
1802 ---- VAR CT      -INF      2.1708E+9      +INF      .
1803
1804      CT      Costo total
1805
1806
1807 **** REPORT SUMMARY :      0      NONOPT
1808                        0      INFEASIBLE
1809                        0      UNBOUNDED
1810
1811
1812 EXECUTION TIME      =      0.016 SECONDS      2 MB      24.6.1 r55820 WIN-VS8
1813
1814
1815 USER: Carlos Paternina      G151020:1317CO-WIN
1816      Universidad del Norte, Industrial Engineering      DC7873
1817
1818
1819 **** FILE SUMMARY

```

```
1820
1821 Input      C:\Users\cacuna\Downloads\QuimicosSA.gms
1822 Output     C:\Users\cacuna\Documents\gamsdir\projdir\QuimicosSA.lst
```